

جامعة البعث

كلية الهندسة الكيميائية و البترولية

ميكانيك السوائل

الدكتور عدنان الشّيخ حمّود

منشورات جامعة البعث 2021 م

ميكانيك السوائل



جامعة البعث

كلية الهندسة الكيميائية و البترولية

ميكانيك السوائل

الدكتور عدنان الشّيخ حمّود

السنة الثالثة – قسم هندسة الغزل

الفهرس

المقدّمة

يُعتبر ميكانيك السوائل واحداً من العلوم الهندسية الأساسية الضرورية لكل مهندس وفني يعمل في قطاع التكنولوجيا والبناء والانشاء وتخطيط المدن و بناء السدود و المفاعلات وابراج التقطير والتكرير إضافة الى أهميته البالغة في بناء السفن والطائرات والمراكب الفضائية والصواريخ بمختلف اصنافها و حتى في قطاع الزراعة و الري وغيرها الكثير من مجالات العلوم والهندسة ومختلف نواحي الحياة .

و تختلف تسمية هذا العلم من قطاع الى آخر فمنهم من يطلق عليه ميكانيك الموائع ومنهم من يطلق عليه ميكانبك السوائل و اخرون يطلقون عليه علم الهيدروليك و بالمحصلة فإن المبادئ الأساسية لهذا العلم تبقى واحدة ويظهر الاختلاف في مراحل متقدمة من التخصص .

و لابد من الإشارة الى أهمية هذا العلم في وصف الظواهر الطبيعية وإيجاد المعادلات الرياضية التي تساعد في فهم هذه الظواهر وإمكانية مواجهتها بل والاستفادة منها لما فيه خير الانسان و تطور البشرية معتمدين على مبادئ التحليل البعدي والتشابه الهيدروليكي إضافة الى قوانين الطبيعة والخبرة الإنسانية على مدى التاريخ .

سوف نتعرف في هذا المقرر على مقدمة في ميكانيك السوائل التطبيقي ، إذ ليس بالإمكان أن نتعرف على هذا العلم بشقيه الرياضي و الهندسي فهو علم واسع جداً يعتمد على مبادئ الرياضيات بشكل أساسي حيث يمكن اعتباره علما رياضياً بامتياز .

وقد تطرقنا الى أهم المواضيع التي تهم المهندس الصناعي كدراسة خواص السوائل و من ثم انتقلنا لمعرفة سكون السوائل (الهيدروستاتيك) مركزين على فهم الضغوط التي يسببها السائل و قوى الدفع على الأسطح الملامسة له وبعدها تعرفنا على مواضيع هامة في الجريان و الضّياعات مع التركيز على السوائل الحقيقة التي تصادف عمل المهندس في حياته العملية ، ولم نغفل بالتطرق الى المضخات و آلية عملها و بعض حساباتها الضرورية . و انتقلنا في الفصل الأخير لنعطي لمحة سريعة عن السوائل اللانيوتونية بشكل مبسط اعتمد الأسلوب الوصفي لسلوك أنواع مختلفة من هذه السوائل .

آمل أن أكون قد وضعت لبنة في البناء العلمي الهندسي الضخم ومساهمة متواضعة لفائدة طلابنا و مهندسينا و فنيينا .

والله ولي التوفيق

حمص 21/1/ 2021 المؤلف

الفصل الأول

صياغة الظواهر في ميكانيك السوائل

التحليل البعدي والتشابه الهيدروليكي

تمهيد :

يبحث الإنسان منذ القدم عن تفسير الظواهر التي تصادفه كل لحظة ، لذلك فقد عمل الباحثون لإيجاد التمثيل الرياضي الذي يصف هذه الظواهر ليس فقط من أجل فهمها وإنما من أجل الاستفادة منها وتسخيرها لتطوير حياته ومحاولة السيطرة على الضّار منها كالعواصف والأعاصير وفيضان الأنهار و غيرها.

كما لم يقف طموح الإنسان عند هذا الحد بل تجاوزه ليستخدم آلية صياغة الظواهر كخطوة أولى وهامة في تصميم الأجهزة والمشاريع الضخمة كالبواخر والطائرات والسفن الفضائية والصواريخ والمضخات والسدود والأنابيب وأقنية نقل السوائل وغيرها الكثير مما يهم البشرية.

تبدأ الصياغة عادة بأن يبدأ الدّارس بالتدقيق والبحث عن العوامل التي يمكن أن تؤثر على الظاهرة المدروسة ليشكل على أساسها بداية معادلة رياضية يسعى إلى حلّها لاحقاً مع التأكيد أن هذه الخطوة لا تلغي اطلاقاً الحاجة إلى اللجوء إلى المختبر لإتمام الصياغة الرياضية والوصول إلى معادلة رياضية لها مدلولها العلمي الصحيح، ومن الضروري في معظم الحالات تصميم نموذج مخبري مصغّر يكون مستنداً أساسياً للانتقال إلى المنشأة الأصلية أو إلى المشروع المزمع تنفيذه.

ولابدّ في البداية من التعرف السريع على بعض المفاهيم والتعاريف والاحاطة المبدئية بالجمل و واحدات القياس للكميات الفيزيائية والتي لابد من التعامل معها خلال الصياغة الرياضية لأي ظاهرة مدروسة.

1.1- الكميّة الفيزيائية:

هي كل كميّة يمكن قياسها عن طريق قيمة رقمية لها مدلول يطلق عليه واحدة القياس فالمسافة مثلاً هي طول ما ، له قيم رقمية ملحقة بواحدة قياس الطول كالمتر أو القدم او الذراع او مضاعفاتها أو أجزاءها ، كذلك الوزن يجب أن يكون له قيمة رقمية ملحقة هي واحدة قياس الوزن كالنيوتن أو الكيلو غرام ثقلي أو غيرها من واحدات قياس الوزن ويعمم هذا المبدأ على كلّ ما يمكن أن يطلق عليه كميّة فيزيائية ، فالقيم الرقمية المجردة تعتبر قيما ليس لها فائدة من الناحية الفيزيائية وتسمى الكمية المترافقة بواحدة قياس بالكمية البُعديّة , فكأنما تدلل واحدة القياس على معنى او مدلول (بُعد) القيمة الرقمية , وقد وُجد أنَّ هناك كميات فيزيائية أساسية غير متعلقة في ما بينها هي الطول والزمن والكتلة ودرجة الحرارة وشدة التيار الكهربائي وكمية المادة وشدة الإشعاع الضوئي والزاوية المستوية والزاوية الفراغية حيث تُقاس هذه الكميات بوحدات

قياس منفصلة كليّاً عن بعضها البعض يُطلق عليها واحدات قياس أساسية . ومن البديهي أن تكون هناك كميات فيزيائية أخرى لكنها تعتمد في قياسها على واحدات قياس تُشتق من الواحدات الأساسية يُطلق عليهاالواحدات المشتقة أما الكميات التي تُقاس بها فتُسمَّى كميات فيزيائية مشتقة فمثلاً السرعة تُقاس في الجملة الدولية بالمتر/الثانية (m/s) حيث تُستخدم واحدة الطول وواحدة الزمن كواحدتي قياس أساسيتين ثم اشتقاق واحدة قياس مشتقة وبالتالي الكمية الفيزيائية المقاسة تسمى كمية فيزيائية مشتقة.

1.2- الجُمل والواحدات:

من الأهمية بمكان التعرف السريع على أهم الجمل المعروفة عالمياً وذلك لأن الباحث ربما يصادف الكثير من المراجع والأجهزة التي تعتمد على واحدات قياس غير الدولية ومن أهم هذه الجمل :الجملة السغثية والجملة المكثية والجملة التقنية والجملة البريطانية ولكلّ من هذه الجُمل كميات فيزيائية أساسية غير مرتبطة مع بعضها البعض تعتمدها أثناء الصياغة الرياضية وبالتالي واحدات قياس أساسية أيضا ليست مرتبطة مع بعضها ونبين باختصار في الجداول التالية الكميات الفيزيائية الأساسية المعتمدة في كل جملة من الجمل الآنفة الذكر:

1.2.1– الجملة السغثية:

الكمية الفيزيائية الأساسية	رمز الكمية	الوحدة الأساسية	رمز الواحدة
الطول	ℓ	السنتيمتر	Cm
الزمن	t	الثانية	S
الكتلة	m	الغرام	g

1.2-2– الجملة المكثية:

الكمية الفيزيائية الأساسية	رمز الكمية	الوحدة الأساسية	رمز الواحدة
الطول	ℓ	المتر	m
الزمن	t	الثانية	S
الكتلة	m	الكيلوغرام	kg

1.2.3– الجملة التقنية:

الكمية الفيزيائية الأساسية	رمز الكمية	الوحدة الأساسية	رمز الواحدة
الطول	ℓ	المتر	m
الزمن	t	الثانية	S
القوة	F	الكيلوباوند	K_P

1.2.4- الجملة الهندسية :

الكمية الفيزيائية الأساسية	رمز الكمية	الوحدة الأساسية	رمز الواحدة
الطول	ℓ	القدم	Foot
الزمن	t	الثانية	S
الكتلة	m	ليبرة كتلة	lb
القوة	F	ليبرة قوة	lb_f

إن عملية التحويل بين هذه الجمل ليست سهلة لذا سنتعرف عليها بعجالة من الجدول(1 -1)

الكمية الفيزيائية	الجملةالسغثية CGS	الجملةالمكثية MKL	الجملة التقنية Tech.S	الجملة البريطانية Br.S	الجملة الدولية SI
الطول	Cm	m	m	Inch=0,254Cm	m
الطول	Cm	m	m	Foot=30,48 Cm	m
الزمن	s	s	s	s	S
الكتلة	g	Kg	$Kp.s^2/m$	Lb=453,592g	Kg
القوة	$dyn=g.Cm/s^2$	$Kg.m/s^2$	Kp=9.8066N	Lbf	$Kg.m/s^2$
الكثافة	g/Cm^3	Kg/m^3	$KP.S^2/m^4$	lb/Cm^3	Kg/m^3
الوزن النوعي	$g/Cm^2.s^2$	$Kg/m^2.s^2$	$Kp/m^3=9.8066pa$	Lbf/Cm^3	$Kg/m^2./s^2$
الضغط	$g/Cm^2.s^2$	$Kg/m.s^2$	Kp/m^2	Torr=101325 Pa	$Pa=N/m^2=kg/m.s^2$
الضغط	mmHg	Atm=760mmHg	Kp/m^2	Torr=101325 Pa	$Pa=N/m^2=kg/m.s^2$
القدرة والعمل	$g.Cm^2/s^2$	$Kg.m^2/s^2$	Kp.m	Btu=1055.0j	$J=N.m=kg.m^2/s^2$
القدرة والعمل	Calory	Kw.h	Kw.h	Cal=4,184J	J
الاستطاعة	$g.Cm^2/s^3$	$Kg.m^2/s^3$	Kp.m/s	Cal/s	Watt=J/s=N.m/s
اللزوجة التحريكية	Poise=g/Cm.s	Kg/m.s	$Kp.s/m^2$	Lb/in.s	$N.s/m^2=kg/m.s$

الجدول (1-1) واحدات قياس بعض الكميات الفيزيائية في جمل مختلفة

إن التنقل بين هذه الجمل يحتاج إلى كثير من الحذر فبالرغم من البساطة الظاهرية يمكن الخطأ بسهولة وسوف أعرض بعض الأمثلة على التعامل مع جمل القياس.

مثال 1.2.1-إن السرعة تتعلق بالمسافة والزمن فكلما كانت المسافة المقطوعة أكبر خلال زمن محدد كانت السرعة أكبر أو كلما كان الزمن أقل لنفس المسافة أيضاً تكون السرعة أكبر أي أن السرعة تتناسب طرداً مع المسافة وعكساً مع الزمن وبالتالي تكتب المعادلة على الشكل التالي:

$$W = K\frac{L}{t} \qquad (1.2.1)$$

المهم في هذه المعادلة هو ثابت التناسب فإذا قيست المسافة بالمتر والزمن بالثانية تصبح واحدة السرعة المشتقة م/ثا ويكون ثابت التناسب K مساوياً للواحد، أما إذا قدرت المسافة بالكيلومتر والزمن بالساعة وطلب أن تعطى السرعة بالمتر/الثانية عندها يكون لثابت التناسب قيمة هي1000/3600 أي $\left[\frac{Km}{h}\right] = \frac{1000[m]}{3600[s]}$

وبالتالي فإن القيمة العددية للسرعة سوف تختلف بمقدار 3,6 مرة أو :

$$W\left[\frac{Km}{h}\right] = 3,6\left[\frac{Km.S}{h.m}\right] = \frac{S}{1}\left[\frac{m}{S}\right]$$

هذا يعني أن ثابت التناسب يساوي 3,6 هذا الثابت يُسمى معامل بعدي – Demensialfactor- الذي يُعقد التعامل مع العلاقة الفيزيائية وذلك نظرا لأن K يتعلق فقط بالتحويل بين الواحدات المشتقة والواحدات الأساسية.

مثال 1.2.2-إن القانون الثاني في الحركة لنيوتن والذي استنتج اعتمادا على ظاهرة طبيعية هو:

$$F=m.a \qquad (1.2.2)$$

حيث:F- القوة و m- كتلة الجسم و a- التسارع

من هذه المعادلة فإن واحدة القوة في الجملة السغثية ستكون $g.Cm/s^2$= dyn وهي واحدة مشتقة أما في الجملة المكثية ستكون $Kg.m/s^2$ وهي أيضاً واحدة مشتقة تدعى بالنيوتن N أما في الجملة التقنية فإن القوة كمية فيزيائية أساسية وواحدة قياسها Kp ستكون واحدة قياس أساسية وعليه فإن واحدة قياس الكتلة ستكون واحدة مشتقة تساوي $Kp.s^2/m$ وبالتالي تُعرّف الكتلة في الجملة التقنية على أنها الكتلة التي إذا تلقّت قوة مقدارها Kp فسوف تحصل على تسارع قدره $1m/s^2$ وبما أن الـ Kp واحدة قياس أساسية فيجب أن تُعرّف بشكل دقيق وأن تحدد قيمتها تماماً وعليه فقد عُرّف كالتالي:

الكيلوباوند: هو القوة التي إذا طُبّقت على كتلة مقدارا 1Kg أكسبتها تسارعا قيمته $9,80665m/s^2$

وبذلك يمكن إجراء التحويلات لواحدات القوة بين مختلف الجمل على الشكل التالي:

$$1[Kp] = 9{,}80665[N] = 9{,}80665\left[\frac{Kgm}{S^2}\right]$$

$$1[Kp] = 9{,}80665[dyn] = 9{,}80665\left[\frac{g.Cm}{S^2}\right]$$

وعليه فإن التحويل بين هذه الجمل يحتاج إلى معامل تحويل بحيث يظهر قانون نيوتن الثاني على الشكل التالي :

$$F=K.m.a \qquad (1.2.3)$$

إن قيمة المعامل K تتعلق باختيار الكميات الأساسية والواحدات الأساسية فإذا اخترنا Kp واحدة لقياس القوة و Kg واحدة لقياس الكتلة و m واحدة لقياس الطول و S واحدة لقياس الزمن تُصبح قيمة K كما يلي:

$$K = \frac{K_P.S^2}{Kg.m} = \frac{K_P}{N}$$

وبالتالي تصبح القيمة العددية لمعامل التحويل كما يلي:

$$K = \frac{1[Kp]}{9{,}80665[N]} = \frac{1}{9{,}80665}\left[\frac{Kp}{N}\right]$$

وهكذا يمكن كتابة القانون الثاني على الشكل التالي:

$$F = \frac{m.a}{g_c}$$

حيث بالمقارنة نجد:

$$g_c = \frac{1}{K}$$

ومنه فإن المعامل g_c يجب أن يساوي:

$$g_c = 9{,}80665\left[\frac{N}{KP}\right]$$

بشكل مشابه يمكن أن نجد قيمة هذا المعامل في الجملة الهندسية على الشكل:

$$g_c = 32{,}174\left[\frac{Lb.foot}{lbf.S^2}\right]$$

1.3- المعادلات الفيزيائية:

المعادلة الفيزيائية هي التعبير الرياضي وبالتالي العددي عن العلاقة بين رموز الكميات الفيزيائية التي تمثّل بدورها قيماً عددية لهذه الكميات أساسية كانت أم مشتقة، لكن هذا التعبير يحمل الكثير من مخاطر الوقوع في الخطأ بسبب عدم الانتباه حين تغطية القيم العددية لرموز الكميات الفيزيائية وهذا ما يوصل إلى نتيجة غير صحيحة في وصف العلاقة الفيزيائية وبالتالي إلى خطأ في النتيجة النهائية.إن العلاقة الفيزيائية- على خلاف المعادلة الرياضية هي علاقة **كميّة** و **نوعية** وبالتالي يجب مقارنة الكميات

المتماثلة بالنوع فقط، لذلك فإن مكوّنات العلاقة الفيزيائية **الصحيحة** يجب أن تُقاس بطريقة واحدة (واحدات متماثلة) عندها تكون المعادلة الفيزيائية متجانسة بعدياً (Dimensionally homogenous Fys. Equation) . إن شرط التجانس البعدي أساسياً في صحة المعادلة الفيزيائية . لذلك يجب تحويل القيم العددية للكميات المُعطاة بواحدات ما إلى قيم ملائمة تبعاً للشروط. أو تحويل العلاقة إلى شكل ملائم لجملة الواحدات التي تُعطى بها قيمة الكميات. فمثلاً معادلة مسافة السقوط الحر تُكتب كعلاقة صحيحة بالشكل التالي:

$$S = \frac{1}{2} g t^2 \qquad (1.3.1)$$

حيث S– مسافة السقوط الحر، g- تسارع الجاذبية الأرضية ، t- زمن السقوط.
تُوضّح هذه المعادل أن المسافة تتناسب طرداً مع جداء التسارع الأرضي ومربع الزمن ويمكن أن نقول أن هذه المعادلة صحيحة إذا تم قياس الطرف الأيسر لهذه المعادلة بنفس واحدات الطرف الأيمن أي الزمن بالثانية والتسارع بالمتر/ مربع الثانية، ولكن لو تمّ قسمة القيمة العددية للتسارع ($9,8 m/s^2$) على 2 فسوف تُصبح المعادلة على الشكل:

$$S = 4,9 t^2 \qquad (1.3.2)$$

هذه المعادلة صحيحة حسابياً ولكنها غير صحيحة فيزيائياً وذلك لأنها غير متجانسة بعديا فالطرف الأيسر له واحدة الطول بينما الأيمن له واحدة الثانية المربعة. من جهة أخرى لو استخدمنا الجملة السغثية للقياس يجب إصلاح المعادلة السابقة لتصبح على الشكل:

$$S = 490\ t^2 \qquad (1.3.3)$$

أيضاً هذه المعادلة غير صحيحة فيزيائيا.
كذلك فإن العلاقات الرياضية بين الكميات الفيزيائية التي لا تعتبر ثابتة بالنسبة لجمل الواحدات لاتحقق في نفس الوقت شروط تشكيل العلاقة الفيزيائية الصحيحة، وذلك لاحتوائها على معامل بُعدي ليس له علاقة بمفهوم المعادلة الفيزيائية المتجانسة بعدياً والثابتة بالنسبة لجُمل الواحدات فمثلاً تعرف القدرة الحركية من العلاقة:

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \qquad (1.3.4)$$

حيث: E القدرة الحركية لجسم ذي كتلة m يتحرك بسرعة V.
هذه المعادلة تحتوي جميع مؤشرات المعادلة الفيزيائية الصحيحة لكن عند استخدام الجملة التقنية للواحدات فإن الكتلة كمية مشتقة وهي تساوي G/g حيث G هو وزن الجسم و g هو تسارع الجاذبية الأرضية بالتعويض تصبح المعادلة (1.3.4) كما يلي :

$$E = \frac{1G}{2g} V^2 \qquad (1.3.5)$$

هذه المعادلة ليست صحيحة بالمفهوم الفيزيائي وذلك لدخول وزن الجسم وتسارع الجاذبية فيها وهذا ما يُخالف المفهوم الفيزيائي للقدرة الحركية علماً أنه من الناحية الحسابية النتيجة صحيحة

1.4- نظرية الأبعاد:

عُرف مفهوم البُعد منذ القرن الثامن عشر من قبل العالم الفيزيائيMaxell إلا أنه لم يُعطي تعريف نهائي لهذا المصطلح علماً ان الباحثون لاحقا اعتبروا أن البُعد هو ترميز للواحدات الأساسية للكميات الفيزيائية الأساسية دون النظر إلى قيمة هذه الكميات أو الواحدات وذلك حسب الجملة المعتمدة فمثلاً يرمز لبُعد الكتلة ككمية أساسية في بعض الجمل بالرمز Mولبُعد الطول بالرمز L ولبُعد الزمن بالرمز T ولبُعد درجة الحرارة بالرمز θ أما في الجملة التقنية فإن القوة هي الكمية الفيزيائية الأساسية لذلك في هذه الجملة يعتمد بُعد القوة ويرمز له بالرمز F وعند ذلك لا تعتبر الكتلة كمية فيزيائية أساسية بل كمية مشتقة ويصبح بُعدها مركباً ويجب استنتاجه بدءا من القانون الثاني لنيوتن F=m.a ويكون $FL^{-1}T^{2}$. ويجب الإشارة إلى أن أبعاد كافة الكميات الفيزيائية تُستنتج من أبعاد الكميات الفيزيائية الأساسية فبُعد السطح أو المساحة L^{2} باعتبار أن المساحة هي جداء طولين وواحدة قياسهاm^2 أو Cm^2 او In^2 أو $foot^2$ كذلك بالنسبة للحجم سيكون البعد L^3 والسرعة مثلاً لها واحدة قياس m/s أي طول/ زمن وبالتالي بعد السرعة LT^{-1} والتسارع LT^{-2} أما الكثافة والتي واحدة قياسها في الجملة الدولية مثلاً Kg/m^{-3} أي كتلة / حجم ومنه سيكون بعد الكثافة ML^{-3} أما في الجملة التقنية حيث القوة كمية أساسية والكتلة كمية مشتقة فإن بُعد الكثافة سيكون $FT^{2}L^{4}$ وهكذا بالنسبة لبقية الكميات الفيزيائية الأخرى وكما وهو ملاحظ فإن البعد يكتب على سطر واحد أي لا يكتب بُعد الكثافة M/L^3 وإنما ML^{-3} كذلك لابد من التنويه أن رموز الأبعاد تكتب بأحرف لاتينية كبيرة حصراً ، وللتعبير عن البُعد يجب وضع رمز الكمية الفيزيائية ضمن قوسين متوسطين [..] فمثلاً العبارة (بعد اللزوجة التحريكية يساوي $ML^{-1}T^{-1}$ تكتب رياضيا بالشكل التالي $[\mu]=ML^{-1}T^{-1}$. تنحصر أهمية استخدام رموز الأبعاد بما يلي:

* يُحدّد بُعد الكمية الفيزيائية نوع الكميات التي اعتبرت أساسية في الجملة المستخدمة.
* يُمكّن بُعد الكمية الفيزيائية من سرعة اشتقاق واحدة هذه الكمية.
* يُمكّن بُعد الكمية الفيزيائية من سرعة اشتقاق العلاقة بين الكميات الفيزيائية لجمل مختلفة.
* يُمكّن الرمز البُعدي من سهولة تدقيق صحة العلاقة الفيزيائية.
* للرمز البُعدي أهمية خاصة في عملية التحليل البُعدي.

وسنبيّن في الجدول (2-1) بعضاً من أبعاد الكميات الفيزيائية :

الكمية	الجملة السغثية CGS		الجملة المكثية MKS		الجملة التقنية Tech.S		الجملة الدولية SI	
	الواحدة	البعد	الواحدة	البعد	الواحدة	البعد	الواحدة	البعد
الطول	Cm	L	m	L	m	L	m	L
المساحة	Cm^2	L^2	m^2	L^2	m^2	L^2	m^2	L^2
الحجم	Cm^3	L^3	m^3	L^3	m^3	L^3	m^3	L^3
الزمن	S	T	S		S	T	S	T
السرعة	Cm/S	LT^{-1}	m/S	LT^{-1}	m/S	LT^{-1}	m/S	LT^{-1}
التسارع	Cm/S^2	LT^{-2}	m/S^2	LT^{-2}	m/S^2	LT^{-2}	m/S^2	LT^{-2}
الكتلة	g	M	Kg	M	$KP.S^2/m^2$	$FL^{-2}T^2$	Kg	M
القوة	$g.Cm/S^2$	MLT^{-2}	$Kg.m/S^2$	MLT^{-2}	KP	F	$Kg.m/S^2$	MLT^{-2}
الكثافة	g/Cm^3	ML^{-3}	Kg/m^3	ML^{-3}	$KP.S^2/m^4$	$FL^{-4}T^2$	Kg/m^3	ML^{-3}
الوزن النوعي	$g/Cm^2.S^2$	$ML^{-2}T^{-2}$	$Kg/m^2.S^2$	$ML^{-2}T^{-2}$	KP/m^3	FL^{-3}	Kg/m^2s^2	$ML^{-2}T^{-2}$
الضغط	$g/Cm\ S^2$	$ML^{-1}T^{-2}$	$Kg./m.S^2$	$ML^{-1}T^{-2}$	KP/m^2	FL^{-2}	$Kg./m.s^2$	$ML^{-1}T^{-2}$
القدرة العمل	$g.Cm^2/S^2$	ML^2T^{-2}	$Kg.m^2./S^2$	ML^2T^{-2}	KPm	$F.L$	$Kg.m^2/S^2$	ML^2T^{-2}
الاستطاعة	$g.Cm^2/S^3$	ML^2T^{-3}	$Kg.m^2/S^3$	ML^2T^{-3}	$KP.m/S$	FLT^{-1}	$Kg.m^2/S^3$	ML^2T^{-3}
اللزوجة	$g/Cm.S$	$ML^{-1}T^{-1}$	$Kg/m.S$	$ML^{-1}T^{-1}$	$KP.S/m^2$	$FL^{-2}T$	$Kg/m.S$	$ML^{-1}T^{-1}$

الجدول (1-2)بعض الكميات الفيزيائية مع واحداتها وأبعادها في جمل مختلف

توجد طريقتان لاستخدام نظرية التحليل البُعدي في صياغة الظواهر الطبيعية.

1.4.1-الطريقة الأولى: الطريقة العادية وتستخدم عندما تكون المتغيرات التي أُحصيت قليلة نسبياً حيث يتم تشكيل معادلة بين الكمية المدروسة (Π) والمتغيرات (Arguments) المتوقع أنها تؤثر عليها بشكل تناسب كالتالي:

$$\Pi \sim f(X_1, X_2, X_3 \ldots X_n) \qquad (1.4.1)$$

ومن ثم تحويل هذا التناسب إلى مساواة بإدخال معامل تناسب ما لتصبح المعادلة على الشكل :

$$\Pi = K.f(X_1, X_2, X_3 \ldots X_n) \qquad (1.4.2)$$

بعد ذلك يتم تشكيل معقد لا بعدي إلى مساواة قوى (أس) الكميات المؤثرة يدعى هذا الجداء غير البعدي لقوى (أس) الكميات باسم (Π –Arguments) ويعبر عنه بالعلاقة:

$$\Pi = K(X_1^a, X_2^b, X_3^c \ldots X_n^i) \qquad (1.4.3)$$

تكون العلاقة السابقة صحيحة فقط إذا كانت لا بُعدية وهذا يتم إذا تحققت المساواة التالية: أبعاد الطرف الأيمن تساوي أبعاد الطرف الأيسر وهذا التعبير يكتب بالشكل التالي:

$$[\Pi] = [X_1]^q, [X_2]^b, [X_3]^c \ldots [X_n]^1 \qquad (1.4.4)$$

استناداً لهذه المساواة يمكن ايجاد القيم العددية للأسس (a,b,c...i) التي تعوض في المعادلة (4.4) لكي نحصل على معادلة رياضية لها معنى فيزيائي مقبول.

ولتوضيح هذه الطريقة سوف نستعرض الأمثلة المحلولة التالية:

<u>مثال –</u> اذا كان الضغط الديناميكي على جسم مغمور في سائل تابعا لكثافة السائل وسرعته فأوجد المعادلة الرياضية التي تصف هذه الظاهرة.

الحل: من نص المسألة نضع التناسب كما يلي:

$$p \sim (\rho, V)$$

نحول هذا التناسب إلى مساواة:

$$P = f(\rho, V)$$

بإدخال معامل تناسب وتشكيل المعقد اللابعدي نجد :

$$P = K.\rho^a.V^b$$

تحدد أبعاد الكميات في المعادلة السابقة:

بُعد الضغط : $[P] = M.L^{-1}.T^{-2}$

بُعد الكثافة : $[\rho] = M.L^{-3}$

بُعد السرعة : $[V] = L..T^{-1}$

نعوض هذه الأبعاد في معادلة المعقد اللابعدي باسقاط ثابت التناسب اللابعدي لعدم الحاجة له نجد:

$$M^1.L^1.T^2 = M^a.L^{-3a}.L^b.T^b$$

بالإصلاح تصبح :
$$M^1.L^1.T^2 = M^a.L^{-3a+b}..T^b$$

بالمقارنة بين طرفاي المعادلة يمكن أن نوجد قيم a=1 و b=2 بالتعويض في المعقد اللابعدي نجد:

$$P = k.\rho.V^2$$

1.4.2-الطريقة الثانية :

وهي تعتمد عل نظرية بوكينغهام التي يأتي توضيحها كما يلي:

نظرية بوكينغهام (نظرية π) في التحليل البعدي:

مثال - أوجد العلاقة بين الكميات الفيزيائية المؤثرة على سقوط كرة قطراها (d) بسرعة (u) في سائل لزوجته التحريكية μ وكثافته ρ علماً أن قوة الإعاقة لسقوط الكرة هي F_d وبحيث يتحقق : $F_d = f(d, u, \mu, \rho)$

الحل:

(a)- نحسب عدد المجموعات اللابعدية: إن عدد المتغيرات هي القوة واللزوجة والكثافة والسرعة والقطر أي أن عدد المتغيرات 5 ، أما عدد الأبعاد الأساسية فهي الطول والكتلة والزمن أي ثلاث أبعاد أساسية ومنه فإن عدد المجموعات اللابعدية هو 2= 3 – 5 . ولكي نوضح الأبعاد الأساسية يفضل أن نضع كل كمية فيزيائية مع واحدة القياس لها وبالتالي مع البعد المتوافق.

$$[\rho] = M.L^{-3}$$
$$[u] = K.T^{-1}$$
$$[\mu] = M.L^{-1}.T^{-1}$$
$$[d] = L$$
$$[F] = M.L.T^{-2}$$

نلاحظ أن هناك 5 كميات فيزيائية تعتبر متغيرات مؤثرة على هذه العلاقة وهناك3 أبعاد أساسية .

(b)- نختار مجموعة تكرار تحقق الشرطين المذكورين سابقاً، هذه المجموعة يجب أن تحتوي

d و u و ρ والباقي من المتغيرات هي F_d و μ

(c) - نختار المجموعات اللابعدية الأولى بدءاً F_d .

$$F_d(M.L.T^{-2})^{-1}$$

$$\Pi_1 = \mathrm{F_d}.\mathrm{M}^{-1}.\mathrm{L}^2 = \mathrm{F_d}.(\rho.\mathrm{d}^3)^{-1}.(\mathrm{d})^{-1}.(\mathrm{d}.\mathrm{u}^{-1})^2$$

$$\Pi_1 = F_d(\rho.d^3)^{-1}.d^{-1}.(d.u^{-1})^2 = F_d.\rho^{-1}.d^{-2}d^{-1}d^2.u^{-2}$$
$$\Pi_1 = F_d.\rho^{-1}.d^{-2}.u^{-2}$$

أو:

$$\Pi_1 = \frac{F_d}{\rho.d^2.u^2}$$

والمجموعة اللابعدية الثانية هي لـ μ :

$$\Pi_2 = \mu(M.L^{-1}.T^{-1})^{-1} = \mu.M^{-1}.L^{+1}.T$$
$$\Pi_2 = \mu(\rho.d^3)^{-1}.d^{+1}.(d.u^{-1}) = \mu.\rho^{-1}d^{-3}.d^1.d^1.u^{-1}$$
$$\Pi_2 = \frac{\mu}{\rho.d.u}$$

وبالتالي:

$$f^*\left(\frac{F_d}{\rho.d^2.u^2},\frac{\mu}{\rho.d.u}\right)$$

علماً أن القيمة اللا بعدية $\frac{\mu}{\rho.d.u}$ هي رقم رينولدز.

بالتالي يمكن أن نكتب:

$$\frac{F_d}{\rho.d^2.u^2} = f^{**}(Re)$$

أو:

$$F_d = \rho.d^2.u^2.f^{**}(Re)$$

أي أن قوة الاعاقة تتناسب طرداً مع كثافة السائل ومع مربع قطر الكرة ومربع سرعتها وتتناسب مع رقم رينولدز والذي يمكن معرفة طريقة العلاقة بينه وبين قوة الإعاقة F_d عن طريقة التجربة.

علاقات مساعدة:

1- إذا كانت إحدى المتغيرات الأساسية لا بُعدية مثل ثابت k مثلاً فهو يشكل مجموعة لوحده.

2- إذا تساوت واحدات اثنتين من المتغيرات مثل (ℓ و d) فإن نسبتهما تشكل مجموعة لا بُعدية.

3- يمكن استبدال أي مجموعة π_i بحاصل ضربها بثابت صحيح أي $\pi_i \equiv 3\pi_i$ على سبيل المثال.

4- يمكن استبدال أي مجموعة لا بُعدية π_i بنفسها مرفوعة لأس صحيح $\pi_i \equiv \pi_i^2$ مثلاً.

1.5-تمارين مساعدة حول الجُمل والواحدات :

تمرين 1.5.1 :

اشتق كلاً من القوة والعمل والاستطاعة والضغط النوعي والوزن والكثافة في الجملة الدولية والجملة التقنية مستعيناً بالشكل البعدي:

(1)القوة : $[F] = m\vec{a} = M..L.T^{-2}$

-الجملةالسغثية: $[F]_{SGS} = gr.Cm.S^{-2}$

-الجملة المكثية: $[F]_{MKS} = Kg.m.S^{-2}$

-الجملة التقنية $[F]_{Tech} = K\rho$

- الجملة الدولية $[F]_{SI} = Kg.m.S^{-2} = N$

(2) العمل: $A = F.L = m.a.l = M..L^2.T^2$

-الجملة السغثية: $[A]_{SGs} = gr.Cm^2.S^{-2} = erg$

-الجملة المكثية : $[A]_{Mks} = Kg.In^2.S^{-2}$

-الجملة التقنية : $[A]_{Tech} = 2K\rho.m$

- الجملة الدولية : $[A]_{SI} = Kg..m^2S^{-2} = Joul$

(3) الاستطاعة: $w = \frac{A}{t} = \frac{F.l}{t} = M.L^2.T^{-3}$

-السغثية: $[w]_{SGs} = gr.Cm^2.S^{-3}$

-المكثية : $[w]_{Mks} = Kg.m^2.S^{-3}$

-التقنية : $[w]_{Tech} = K\rho.m.S^{-1}$

- الدولية: $[w]_{SI} = Kg..m^2S^{-3} = wat$

(4) الضغط $M..L^{-1}.T^{-2}$

(5) الوزن النوعي $M..L^2.T$

(6) الكثافة $M..L^{-3}$

(7) اللزوجة $M..L^{-1}.T^{-1}$

Ӿ - توضيح اللزوجة:

ليكن لدينا صفيحتين السفلى ثابتة والعليا متحركة بينهما سائل ما. لدفع الصفيحة العليا لا بد من قوة ما. هذه القوة تزداد كلما ازدادت مساحة الصفيحة كما تحتاج لقوة دفع أكبر كلما ازدادت سماكة السائل بين الصفيحتين حيث أن القوة تكسب الصفيحة العليا سرعة $\vec{u}$ مثلاً.

وعليه فإن: $F \sim (A, \frac{du}{dy})$

$$F = k.A.\frac{du}{dy}$$

نسمي الثابت K باسم اللزوجة التحريكة ويرمز له بالرمز μ لتصبح العلاقة:

$$F = \mu.A\frac{du}{dy}$$

لتحديد واحدة قياس هذا الثابت (اللزوجة) نعتمد على الأبعاد:

$$[M.LT^{-2}] = [\mu][L^2][LT^{-1}][L^{-1}]$$

$$[\mu] = \frac{[M.LT^{-2}]}{[L^2][LT^{-1}][L^{-1}]}$$

$$[\mu] = M.L^{-1}.T^{-1}$$

- -في الجملة السغثية:

$$gr.Cm^{-1}.S^{-1}$$

طبعا السنتي بواز (نقسم على 100) يصبح:

$$Cpoise = \frac{Poise}{100} = \frac{gr.Cm^{-1}.S^{1}}{100} = gr.m^{-1}.S^{-1}$$

gr/m.s=Cpoise

- -المكثية : $Kg.m^{-1}.s^{-1}$
- -الدولية: $Kg.m^{-1}.s^{-1}$
- -التقنية: $[\mu]_{Tech} = \frac{KP.S}{m^2}$

تمرين 1.5.2:

إذا علمت أن لزوجة الغليسرين في الدرجة $30^{\circ}C$ تساوي $\mu_{30C^0} = 6.29\ gr.Cm^{-1}.S^{-1}$

فما هي القيمة العددية لهذه اللزوجة في الجملة المكثيّة والجملة التقنية .

الحل :

$$6.29\frac{gr}{Cm.S} = 6.29\frac{\frac{Kg}{1000}}{\frac{m}{1000}.S} = 6.29\frac{Kg - 10^{-3}}{m.10^{-2}S} = 6.29\frac{Kg.10^{-1}}{m.s}$$

$$\mu_{MKS} = 0.629\frac{Kg}{m.s}$$

في الجملة التقنية:

$$0.629\frac{V.g}{m.s}x\frac{m.s}{m.s} = 0.629\frac{Kg.m}{S^2}.\frac{S}{m^2} = 0.629N.\frac{S}{m^2}$$

لكن في الجملة التقنية واحدة القوة هي KP وتساوي 9.81N تصبح القيمة:

$$= 0.629.\frac{KP}{9.81}.\frac{S}{m^2}$$

$$= \frac{0.629}{9.81}\frac{P.S}{m^2}[F.L^{-2}.T]$$

تمرين (1.5.3):

التعريف برقم R_e وشرحه $Re = \frac{w.\rho.d}{\mu}$

المطلوب : حساب القيمة العددية لرقم رينولدز إذا كان:

$$w = 0.6m/s$$
$$\rho = 1.24x10^{-3}gr/Cm^3$$
$$d = 0.51Cm$$
$$\mu = 1.28x10^{-2}Cpoise$$

الحل :

لنبدأ بالجملة الدولية:

$$-w = 0.6m/s$$
$$-P = 1.24x10^{-3}gr/Cm^3 = 1.24Kg/m^3$$
$$-d = 0.51Cm = 0.51x10^{-2}m$$
$$\mu = 1.28x10^{-2}\phi = 1.28x10^{-2}x10^{-2}\frac{Kg}{m.s}$$
$$Re = \frac{0.6x1.24x0.5x10^{-2}}{1.28x10^{-5}} = 286.4$$

للتوضيح : ان رقم رينولدز هو قيمة بلا واحدة

$$\frac{m.s^{-1}.Kg.m^{-3}.m}{Kg.m^{-1}.S^{-1}} = \frac{Ktm^{-1}.S^1}{Kg.m^{-1}.S^{-1}}$$

تمرين (1.5.4):

يعطى قطر الحبيبات تبعاً للعلاقة التالية:

$$d = 2.14\left[\frac{A_r.\mu^2}{\gamma_F(\gamma_s - \gamma_F)}\right]^{1/3}$$

حيث:

Ar- قيمة لابعدية تمثل عدد أرخميدس ، μ- اللزوجة التحريكية ، γ- الوزن النوعي

أولاً - تأكد إن كانت العلاقة السابقة متجانسة باستخدام معادلة الأبعاد أو باستخدام وحدات الكميات الفيزيائية.
ثانياً – بيّن إذا كانت العلاقة السابقة ثابتة أم لا. وإذا لم تكن ثابتة حولها إلى علاقة ثابتة.

الحل:

أولاً - نحصر الكميات الفيزيائية الموجودة في العلاقة :

الكمية	الرمز	البعد	واحدة القياس
القطر	d	L	m
اللزوجة	μ	$M.L^{-1}.T^{-1}$	$Kg/m.S$
الوزن النوعي	γ	$M.L^{-2}.T^{-2}$	$Kg/m^2.S^2$

نعوض في العلاقة :

$$L = \left[\frac{M^2.L^2.T^{-2}}{M^2.L^{-4}.T^{-4}}\right]^{1/3}$$

$$L = [L^2.T^2]^{1/3}$$

إذاً العلاقة الفيزيائية غير متجانسة.
ثانياً- إن الثابت الموجود في الطرف الأيمن من المعادلة هو ثابت بعدي (له وحدة قياس) وبالتالي فإن العلاقة تتصف بعدم الثباتية :
لنحدد أبعاد هذا الثابت اي العدد 2.14 :

$$L = 2.14[L^2.T^2]^{1/3}$$

أو:

$$[2.14] = L^{-2/3}.T^{-2/3}$$

$$[2.14] = l^{1/3}.T^{-2/3}$$

أو:

$$[2.14]^3 = L.T^{-2}$$

لاحظ أن القيمة $(2.14)^3$ تساوي 9.81 وواحدة قياسها m/S^2 أي أن هذا الثابت هو الجذر التكعيبي لتسارع الجاذبية الأرضية وبإدخال هذا الثابت إلى العلاقة نجد:

$$d = \left[\frac{g.Ar.\mu^2}{\gamma_F.(\gamma_S - \gamma_F)}\right]^{1/3}$$

بالتعويض بالأبعاد نجد:

$$L = \left[\frac{L.T^{-2}.M^2.L^{-2}.T^{-2}}{M^2.L^{-4}.T^{-4}}\right]^{1/3}$$

$$L = [L^3]^{1/2} = L$$

بهذا الشكل أصبحت العلاقة متجانسة وأصبحت ثابتة أيضاً من أجل استخدام واحدات الجمل المتماسكة. طبعاً هذا التحويل يتطلب معرفة جيدة بالقوانين الفيزيائية.

1.6 - التشابه الهيدروليكي :

التشابه الهندسي والحركي والتحريكي:

إن النمذجة تعني تصميم جهاز مخبري يحاكي الجهاز الأصلي ولكي يتم تصميم هذا الجهاز بشكل علمي صحيح يجب أن يحقق التشابهات الثلاثة:

1.6.1-التشابه الهندسي:

يعني أن كل أبعاد الجهاز ℓ_m متناسبة مع أبعاد الجهاز الحقيقي ℓ_n والتناسب $\frac{\ell_m}{\ell_n}$ يساوي دائماً نسبة b ثابتة أي :

$$\frac{\ell_m}{\ell_n} = const = b \qquad (1\text{-}6\text{-}1)$$

ويسمى b المقاس الخطي أو مقاس الطول.

1.6.2-التشابه الحركي: تناسب السرعة المتوسطة في المناطق المتناظرة ما بين النموذج والجهاز الحقيقي ذو قيمة ثابتة مقاس السرعة :

$$\frac{V_m}{V_n} = const = b_r \qquad (1\text{-}6\text{-}2)$$

مقاس التسارع

$$\frac{a_m}{a_n} = const = b_a \qquad (1\text{-}6\text{-}3)$$

كما يمكن أن نعبر عن التسارع أنه تغير السرعة مع الزمن:

$$a_m = \frac{dV_m}{dt_m} = \frac{d^2\ell_m}{d\ell_m^2} \Rightarrow b_a = \frac{d^2\ell}{d^2\ell_n} = \frac{dt_n^2}{dt_m^2} \Rightarrow b_a = \frac{b}{b_t^2}$$

$$a_n = \frac{dV_n}{dt_n} = \frac{d\ell_m}{dt_n^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}4)$$

حيث:

$$b_t = \frac{dt_m}{dt_n}$$

كذلك فإن:

$$dt = \frac{d\ell}{dV} \Rightarrow b_t = \frac{d\ell_m.dv_n}{d\ell_n.dvm} = \frac{b}{b_v} \qquad (1\text{-}6\text{-}5)$$

1.6.3- التشابه التحريكي:

نعتبر أن النموذج مشابه تحريكياً للجهاز الحقيقي إذا تحقق الشرطان:

1- في أي نقطة من نقاط الجهاز تؤثر قوة مشابهة بطبيعتها واتجاهها للقوة التي تؤثر في الجهاز الحقيقي في المنطقة التي تناظرها.

2- نسبة مجموع القوى في النموذج F_m إلى مجموع القوى في الجهاز الحقيقي F_n وفي كل النقاط المتناظرة هي قيمة ثابتة وتسمى مقاس القوة :

$$\frac{F_m}{F_n} = b_F = const \qquad (1\text{-}6\text{-}6)$$

1.6.4-التشابه الهيدروليكي:

نقول عن نموذج أنه مشابه هيدروليكياً للجهاز الحقيقي إذا تحققت التشابهات الثلاث السابقة معاً لذلك لابد من إيجاد علاقة بين المقاسات b_F , b_v , b هذه العلاقة ليست اعتباطية وإنما تخضع لقانون ما. من قانون نيوتن الأول لدينا :

$$F= m.a \qquad (1\text{-}6\text{-}7)$$

حيث : $m = \rho.V$

$$b_F = \frac{F_m}{F_n} = \frac{\rho_m.V_m.a_n}{\rho_n.V_n.a_n} \qquad (1\text{-}6\text{-}8)$$

فإذا اعتبرنا أنا $b_\rho = \frac{\rho_m}{\rho_n}$ فإن :

$$b_F = b_\rho . b^3 . b_a \qquad (1\text{-}6\text{-}9)$$

لكن b^3 يمن ان تُكتب : $b^2.b$ و b_a هي : $\frac{b}{b_t^2}$

نجد:

$$b_F = b_\rho . b^3 . \frac{b}{b_t^2}$$

$$b_F = b_\rho . b^2 . b_v^2$$

يُطلق على هذه العلاقة اسم علاقة نيوتن أو قانون نيوتن في التشابه ويُصاغ على الشكل التالي : (عند حركة السائل تنشأ فيه قوى عطالة). ويمكن أن تُكتب على الشكل التالي:

$$b_F = \frac{F_m}{F_n} = \frac{\rho_m.\ell_m^2.V_m^2}{\rho_n.\ell_n^2.V_n^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}10)$$

أو بطريقة أخرى:

$$\frac{F_m}{\rho_m.l_m^2.V_m^2} = \frac{F_n}{\rho_n.l_n^2.V_n^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}11)$$

هذه النسبة ثابتة وهي قيمة لا بعدية ويطلق عليها (رقم نيوتن) Ne ويظهر أحياناً رقم Ne على الشكل التالي: وذلك بعد ضرب البسط والمقام بالطول l أي:

$$Ne = \frac{F.l}{\rho.l^3.V^2} = \frac{F.l}{M.V^2} = const \qquad (1\text{-}6\text{-}12)$$

حيث l^3 تمثل حجم (طول للتكعيب) والجداء بين الحجم والكثافة يعطي الكتلة.

وبالنتيجة:

نقول عن جسمين أنهما متشابهان هيدروليكياً إذا كان:

رقم نيوتن للأول يساوي رقم نيوتن للثاني.

الثابت اللا بعدي في المعادلة السابقة يسمى رقم نيوتن ويرمز له بالرمز

$$\frac{F}{\rho \ell^2 V^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}13)$$

الذي يظهر أحياناً على الشكل التالي:

$$Ne = \frac{F.\ell}{m.V^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}14)$$

وباختصار نستطيع القول: **يتحقق التشابه الهيدروليكي إذا كان رقم نيوتن للنموذج ورقم نيوتن للأصل متساويين.**

1.6.5-أرقام التشابه الهيدروليكي:

إن الرقم الأول الذي تعرفنا عليه هو رقم نيوتن الذي تُعبر فيه القوة عن مختلف القوى المؤثرة ، لكن التجربة العملية تُثبت أن هناك قوى لها تأثير يطغى على قوى أخرى وذلك حسب الحالة المدروسة مما يُسهّل في كثير من الأحيان العمليات الرياضية ويخفف من صرامة الشروط المطبقة لذلك سوف نناقش بعض الحالات التي يكون لقوة ما تأثيراً واضحاً بالنسبة للقوى الأخرى التي يمكن إهمال تأثيرها

- الحالة الأولى : حركة السائل في الأنابيب:

إن الدور الأكبر عند حركة السائل في الأنابيب يكون **لقوى الاحتكاك** والتي تُعطى بالعلاقة:

$$F = \tau . A = \tau . \ell^2 \qquad (1\text{-}6\text{-}15)$$

حيث : τ – الاجهاد المماسي وله واحدة قياس الضغط N/m^2

A– (السطح – المساحة – أو مربع الطول)

بالتعويض بمعادلة نيوتن نجد:

$$\frac{F}{\rho \ell^2 V^2} = \frac{\tau \ell^2}{\rho \ell^2 V^2} = \frac{\tau}{\rho V^2} = const \qquad (1\text{-}6\text{-}16)$$

بما أن الاجهاد المماسي يُعطى بالعلاقة التالية:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} = \mu \frac{V}{\ell} \qquad (1\text{-}6\text{-}17)$$

حيث $\frac{dV}{dy}$- هو تدرج السرعة (تغير السرعة مع الارتفاع أي مع طول ℓ.
بالتعويض نجد:

$$\frac{\mu \frac{V}{\ell}}{\rho V^2} = \frac{\mu}{\ell . V . \rho} = const \qquad (1\text{-}6\text{-}18)$$

مقلوب هذا الرقم اللابعدي يسمى رقم **رينولدز Reynolds** ويرمز له بالرمز Re أي

$$Re = \frac{\rho V \ell}{\mu} \qquad (1\text{-}6\text{-}19)$$

و عليه يمكن القول أنه يتحقق التشابه الهيدروليكي بين النموذج والأصل عند الجريان في الأنابيب الملساء هيدروليكياً إذا كان رقمي **رينولدز** في الحالتين متساويات أي Re_m = Re_n ، وفي الحالة التي يستخدم فيها نفس السائل أي له نفس اللزوجة ونفس الكثافة تتبسط العلاقة لتصبح:

$$V_m \ell_m = V_n \ell_n$$

أو بشكل آخر: $V_n = \frac{V_m \ell_m}{\ell_n}$ ولكن $b = \frac{\ell_m}{\ell_n}$ نجد: $Vn = bVm$

أي لكي يتحقق التشابه الهيدروليكي عند الجريان في الأنابيب الملساء هيدروليكياً يكفي أن تكون سرعة الجريان في الواقع مساوية لجداء سرعة الجريان في النموذج بمقاس الطول.

- الحالة الثانية : عندما يكون الدور الأكبر لقوى الضغط:

يرمز لقوى الضغط إما بالرمز F_P أو P وهي تساوي إلى جداء الضغط بالسطح أي F_p=P.A فإذا عوضنا بمعادلة رقم نيوتن نجد:

$$\frac{P_m A_m}{\rho_m \ell_m^2 V_m^2} = \frac{P_n A_n}{\rho_n \ell_n^2 V_n^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}20)$$

وبما أن ℓ^2 في كلا الطرفين هو تعبير عن مساحة لذا يمكن إجراء الاختزال بين A و ℓ^2 في كل طرف على حدا لتصبح المعادلة على الشكل التالي:

$$\frac{P_m}{\rho_m V_m^2} = \frac{P_n}{\rho_n V_n^2} = const \Rightarrow Eu = \sqrt{\frac{P}{\rho V^2}} \qquad (1\text{-}6\text{-}21)$$

هذا الرقم اللا بعدي الناتج يسمى رقم أُيلرEuler وبالتالي يمكن القول أن يتحقق التشابه الهيدروليكي عند تأثير **قوى الضغط** إذ تساوى **رقمي إيلر** في النموذج وفي الأصل .

- الحالة الثالثة: عندما يكون الدور الأهم لقوى الجاذبية:

تُعطى قوى الجاذبية بالعلاقة $F_g = m.g$ حيث m هي كتلة الجسم والتي يمكن التعويض عنها بجداء الكثافة والحجم وعند التعويض في المعادلة السابقة نجد:

$$\frac{m_m g_m}{\rho_m \ell_m^2 V_m^2} = \frac{m_n g_n}{\rho_n \ell_n^2 V_n^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}22)$$

بالتعويض عن قيمة الكتلة نجد:

$$\frac{\rho m \ell_m^2 g_m}{\rho_m \ell_m^2 V_m^2} = \frac{\rho_n \ell_n^3 g_n}{\rho_n \ell_n^2 V_n^2} = const \qquad (1\text{-}6\text{-}23)$$

وباختصار الكثافة في كل طرف وإجراء بعض الاصلاحات تصبح المعادلة على الشكل التالي:

$$\frac{V_n^2}{\ell_n g_n} = \frac{V_m^2}{\ell_m g_m} = const \Rightarrow Fr = \frac{V}{\sqrt{\ell_g}} \qquad (1\text{-}6\text{-}24)$$

الرقم اللا بعدي الناتج يدعى رقم فرود *Frod* ومنه نقول يتحقق التشابه الهيدروليكي عند تأثير **قوى الجاذبية** إذا كان **رقما فرود** للأصل وللنموذج متساويان.

- الحالة الرابعة: عندما يكون لقوى التوتر السطحي الدور الأهم:

لدينا قوة الشد السطحي تعطى بالعلاقة:

$$R = \sigma . \ell \qquad (1\text{-}6\text{-}25)$$

حيث σ هو معامل التوتر السطحي و ℓ هو المحيط المبلل لسطح التماس بين السائل والأنبوب ونعرف أن معامل الشد السطحي σ يعطى بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{1}{4} \rho . g . . d . h \qquad (1\text{-}6\text{-}26)$$

حيث h هو مقدار الارتفاع الشعري وهو طول L

D هو قطر المحيط المبلل وهو طول أيضاً L

لذلك يمكن أن نكتب علاقة معامل التوتر السطحي

$$[\sigma] = \rho . g . \ell^2 \qquad (1\text{-}6\text{-}27)$$

كقيمة بعدية غير رقمية

وبالتالي:

$$R = \rho . g . \ell^2 . \ell \qquad (1\text{-}6\text{-}28)$$

وبالعودة لعلاقة نيوتن:

$$\frac{F_m}{\rho_m . \ell_m^2 . V_m^2} = \frac{F_n}{\rho_n . \ell_n^2 . V_n^2} = const \qquad (1\text{-}6\text{-}29)$$

نجد بالتعويض:

$$\frac{\rho_m .g_m .\ell_m}{\rho_m .\ell_m^2 .V_m^2} = \frac{\rho_n g_n , \ell_n^2 .\ell_n}{\rho_n .\ell_n^2 .V_n^2} = const \qquad (1\text{-}6\text{-}30)$$

أي :

$$\frac{\rho .g .\ell^2 .\ell}{\rho .\ell^2 .V^n} = const$$

لكن $\rho .g .\ell$ هوσ تصبح العلاقة :

$$\frac{\sigma .\ell}{\rho .\ell^2 .V^n} = const$$

أو:

$$\frac{\sigma}{\rho .\ell .V^n} = const$$

أو مقلوب هذا الثابت سيكون ثابتاً أيضاً:

$$C'' = \frac{\rho \ell V^2}{\sigma}$$

الجذر التربيعي لهذا الثابت سيكون ثابتاً أيضاً :

$$\sqrt{C'} = \sqrt{\frac{\rho .\ell .V^2}{\sigma}}$$

هذا الجذر يسمى ثابت We ويبر Webar :

$$We = \sqrt{\frac{\rho .\ell .V^2}{\sigma}} \qquad (1\text{-}6\text{-}31)$$

لذلك يمكن أن نقول:

يتحقق التشابه الهيدروليكي بين النموذج والأصل في حالة كان لقوة **الشد السطحي** الدور الأكبر.. عندما يتساوى رقمي **ويبر** للأصل والنموذج.

- الحالة الخامسة: عند السرعات العالية جداً :

$$\frac{\vec{F}}{\rho .\ell^2 .V^2} \qquad (1\text{-}6\text{-}32)$$

وعندما يكون المائع قابلاً للانضغاط فالقوى المؤثرة هي قوى المرونة حيث:

$$\vec{F} = E .\ell^2 \qquad (1\text{-}6\text{-}33)$$

حيث E: هو معامل المرونة أو ما يسمى معامل الانضغاطية ويحسب وفق العلاقة :

$$E = \rho.a^2 \qquad (1\text{-}6\text{-}34)$$

a : هي سرعة الصوت.

فإذا عوضنا قيمة قوى المرونة بالمعادلة الأساسية نجد:

$$\frac{E.\ell^2}{\rho.\ell^2 V^2} = \frac{E}{\rho V^2} = const$$

لاحظ أنك لو عوضت $E = \rho a^2$ فإن التناسب $\frac{E}{\rho V'}$ سيكون بلا واحدة .

مقلوب هذا الثابت سيكون ثابت أيضاً أي:

$$const` = \frac{\rho V^2}{E} = \frac{V^2}{\frac{E}{\rho}}$$

الجذر التربيعي لهذا الثابت سيكون ثابتاً أيضاً وبلا واحدة وسيأخذ الشكل:

$$\sqrt{const}` = \frac{V}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}$$

هذا الثابت يسمى رقم ماخ ويرمز له بالرمز

$$Ma = \frac{V}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \qquad (1\text{-}6\text{-}35)$$

هذه الأرقام تسهل المعالجة الرياضية وتُعطي صورة واضحة للتنبؤ عن شروط وإمكانية النمذجة للوصول إلى المنشأة الطبيعية بالشكل الأمثل.

1.6.6- أمثلة محلولة في التشابه الهيدروليكي :

مثال 1- إذا كانت قوى الجاذبية وقوى العطالة هما المؤثرات فأثبت أن نسبة التدفق في النموذج إلى التدفق في الأصل (مقاس التدفق) تساوي مقاس الطول مرفوعاً للأس 5/2

الحل:

إن التدفق في النموذج يساوي: $Q_m = \frac{\ell_m^3}{t_m}$

أما التدفق في الأصل $Q_n = \frac{\ell_n^3}{t_n}$

ومنه نجد مقاس التدفق : $$b_Q = \frac{Q_m}{Q_n} = \frac{b^3}{b_t}$$

قوى الجاذبية: $$\frac{F_{gm}}{F_{gn}} = \frac{\gamma_m}{\gamma_n}\frac{\ell_m^3}{\ell_n^2} = b_\lambda b^2$$

قوى العطالة: $$\frac{F_m}{F_n} = \frac{m_m}{m_n}\frac{a_m}{a_n} = \frac{\rho_m}{\rho_n}\frac{\ell_m^3}{\ell_n^2}\frac{\ell_m}{\ell_n}\frac{t_n^2}{t_m^3} = b_\rho b^3 \frac{b}{b_t^2}$$

ولكي يتحقق التشابه الهيدروليكي يجب أن يتحقق قانون نيوتن في التشابه أي :

$$b_\rho . b_a . b^3 = b_\gamma b^3 \frac{b}{b_2}$$

حيث: $$b_g . b_\upsilon = b_\alpha$$

ومنه نجد:

$$b_t^2 = \frac{b_\rho b^3 b}{b_\gamma b^2}$$

لكن : $$\frac{b_r}{b_\rho} = b_g$$ حيث : $$b_g = \frac{g_m}{g_n} = 1$$

ومنه نجد:

$$b_t^2 = b \Rightarrow bt = b^{1/2}$$

وبالتعويض في مقاس التدفق نجد:

$$b_Q = \frac{Q_m}{Q_n} = \frac{b^3}{b^{\frac{1}{2}}} = b^{\frac{5}{2}}$$

مثال 2-يجري ماء درجة حرارته $15.6^\circ C$ في أنبوب قطره 152.4mm بسرعة 3.66m/s فما هي السرعة التي يجب أن يجري فيها زيت متوسط اللزوجة عند الدرجة $32.2^\circ C$ في أنبوب قطره 76.2mm لكي يكون الجريان في الأنبوبين متشابهاً هيدروليكياً.

الحل: إن الجريان في الأنابيب يخضع عادة لقوى الاحتكاك (اللزوجة) لذلك فإن رقم رينولدز هو المعيار للتشابه الهيدروليكي أي: $Re_{water} = Re_{oil}$ وهذا يعني :

$$\frac{V_w d_w}{v_w} = \frac{V_o d_o}{v_o}$$

حيث : v هي اللزوجة الحركية وتساوي قسمة اللزوجة التحريكية على الكثافة $v = \mu / \rho$

ومن الجداول نجد:اللزوجة الحركية للماء عند الدرجة $15.6^{\circ}C$ تساوي $1,13.10^{-6}m^2/s$ واللزوجة الحركية للزيت عند الدرجة $32.2^{\circ}C$ تساوي $2,96.10^{-6}m^2/s$

وبالتعويض نجد:
$$\frac{3,66.152,4}{1,13.10^{-6}} = \frac{V_o\,76.2}{2,96.10^{-6}}$$

وبالتالي فإن قيمة سرعة الزيت المطلوبة هي: $V_o=18.2m/s$ التي عندها يتحقق التشابه الهيدروليكي.

مثال 3- ما هو قطر الأنبوب اللازم لنقل ماء في الدرجة $15.6^{\circ}C$ وبسرعة 1.11m/s حتى يُشابه هيدروليكياً حركة الهواء ذو الدرجة $20^{\circ}C$ في أنبوب قطره 610mm بسرعة متوسطة 1.83m/s .

الحل: من الجداول نجد اللزوجة الحركية للهواء في الدرجة $20^{\circ}C\,14,56.10^{-6}m^2/s$ واللزوجة الحركية للماء في الدرجة $15.6^{\circ}C\,1,130.10^{-6}m^2/s$.

وكما وجدنا سابقاً فإن تساوي رقمي رينولدز كافياً لإثبات التشابه عند الحركة في الأنابيب لذلك بالتعويض نجد:
$$\frac{1,83..610}{14,86.10^{-6}} = \frac{1,11.d}{1,130.10^{-6}}$$

مثال 4- سفينة طولها 140m تتحرك بسرعة 7.6m/s أحسب:

- رقم فرود
- سرعة نموذج بمقاس 1/30 يعوم في نفس الماء ويحقق تشابهاً حركياً مع الأصل.

الحل: يُحسب رقم فرود من العلاقة نجد:
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\ell.g}} = \frac{7,6}{\sqrt{180 \times 9,81}} = 0,205$$

أما سرعة النموذج فتحسب أيضاً من نفس العلاقة السابقة باعتبار أن قوى الجاذبية هي ذات التأثير الأكبر وبالتالي فإن تساوي رقمي فرود يفي لتحقيق التشابه:
$$\frac{7.6}{\sqrt{140}} = \frac{V_m}{\sqrt{\frac{140}{30}}} \Rightarrow V_m = 1,388m/s$$

وهي سرعة النموذج المخبري الأصغر هندسياً بثلاثين مرة والتي يتحقق عندها التشابه الحركي.

مثال (5)-إذا كانت قوى الجاذبية وقوى العطالة هما المؤثران الوحيدان فوضح أن نسبة التدفق في النموذج إلى التدفق في الأصل تساوي قياس الطول مرفوعاً للأس 5/2

الحل:

التدفق في الأصل = $Q_n = \frac{L_n^3}{t_n}$

التدفق في النموذج = $Q_m = \frac{L_m^3}{t_m}$

$$\Rightarrow b_Q = \frac{Q_m}{Q_n} = \frac{b^3}{b_t}$$

قوى الجاذبية $\frac{G_m}{G_n} = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{L_m^3}{L_n^3} = b_\gamma . b^3$

$$\frac{F_m}{F_n} = \frac{M_m . a_m}{M_n . a_n} = \frac{\rho_m}{\rho_n} \cdot \frac{L_m^3}{L_n^3} \cdot \frac{L_m}{L_n} \cdot \frac{t_n^2}{t_m^2} = b_\rho . b^3 . b / b_t^2$$

وحتى يتحقق التشابه الهيدروليكي يجب أن يتحقق قانون نيوتن في التشابه أي قياس قوى العطالة = قياس قوى الجاذبية.

$$b_\gamma . b^3 = b_\rho . b^3 . b / b_t^2$$

$$b_t^2 = \frac{b_\rho b^3 . b}{b_\gamma . b^3}$$

لكن $\frac{b_\gamma}{b_\rho}$ هي b_g حيث $1 = \frac{g_m}{g_n} = b_g$ ومنه:

$$b_t^2 = \frac{b}{b_g} = b$$

بالتعويض في مقاس التدفق:

$$b_Q = \frac{Q_m}{Q_n} = \frac{b^3}{b_t} = \frac{b^3}{b^{1/2}} = b^{5/2}$$

مثال (6)– إذا كانت الجاذبية وقوة العطالة هما المؤثران الوحيدان فأوجد نسبة السرعة (مقاس السرعة) ونسبة قوى الضغط.

الحل:

لدينا:

$$b_t^2 = \frac{b_\rho . b^3 . b}{b_\gamma . b^2} = \frac{b}{b_g}$$

بقسمة هذه المعادلة على b^2 حيث b_g=1 نجد :

$$\frac{b_t^2}{b^2} = \frac{1}{b}$$

المطلوب هو :

$$\frac{b^2}{b_t^2} = b$$

لكن القيمة $b_u^2 = \frac{b^2}{b_t^2}$ ومنه نجد:

$$b_n^2 = b$$

أو:

$$\frac{V_n^2}{V_m^2} = \frac{L_n}{L_m}$$

أما نسبة قوى الضغط:

$$\frac{P_m}{p_n} = \frac{p_m . L_m^2}{P_n . L_n^2} = b_\rho . b^2$$

نسبة قوى الجاذبية:

$$\frac{G_m}{G_n} = b_\gamma . b^3$$

تساوي هاتين القيمتين وفق قانون نيوتن:

$$b_\rho . b^2 = b_\gamma . b^2 \Rightarrow b_r = b_\gamma . b$$

لكن: $\Leftarrow b_v^2 = b$

$$b_\rho = b_\gamma . b_v^3 \Rightarrow \frac{P_m}{P_n} = b_\rho . b^3 . b_\gamma . b_v^2$$

أو يمكن أن تكتب على الشكل:

$$\frac{P_m}{p_n} = \frac{p_m . L_m^2}{P_n . L_n^2} = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} . \frac{L_m^2}{L_n^2} = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} . \frac{V_m^2}{V_n^2}$$

مثال (7)-استنتج قانون رقم رينولدز للأصل والنموذج ، لمائع يتحرك بتأثير قوى العطالة واللزوجة فقط و بإهمال المؤثرات الأخرى.

الحل:

بالنسبة لقوى العطالة فإن نسبتها كما وجدناه في المسألة الأولى:

$$\frac{F_m}{F_n}=\frac{m_m.a_m}{m_n.a_n}=\frac{\rho_m}{\rho_n}.\frac{L_m^3}{L_n^3}.\frac{L_m}{L_n}.\frac{T_n^2}{T_m^2}=\frac{b_\rho.b^3.b}{b_t^2}$$

أما نسبة قوى اللزوجة (الاحتكاك):

$$\frac{\tau_m}{\tau_n}=\frac{\mu_m\frac{L_m^2}{T_m}}{\mu_n\frac{L_n^2}{T_n}}=b\mu\frac{b^2}{bt}$$

حسب قانون نيوتن فإن قوى العطالة تتساوى مع قوى الاحتكاك عند التشابه الهيدروليكي:

$$\frac{b_\rho b^2}{b_\gamma^2}=b_\mu.\frac{b^2}{b_t}$$

$$b_t=\frac{b_\rho.b^2}{b_\mu}$$

لكن قيمة b_t هي من مقاس السرعة كما يلي :

$$b_t=\frac{b}{b_v}\Leftarrow b_v=\frac{b}{b_t}$$

$$=\frac{b}{b_v}=\frac{b_\rho}{b_\mu}\Rightarrow b_v=\frac{b.b_\mu}{b_\rho.b^2}=\frac{b_\mu}{b_\rho.b}$$

ولوعدنا لكتابة هذه القيمة بدلالة قيم النموذج والأصل نجد:

$$\frac{V_m}{V_n}=\frac{\frac{\mu_m}{\mu_n}}{\frac{\rho_m}{\rho_n}\frac{L_m}{L_n}}$$

في الحدود للأصل في طرف وللنموذج في طرف آخر نجد:

$$\frac{V_n.\rho_n.L_n}{\mu_n}=\frac{V_{m.}.\rho_m.L_m}{\mu_m}=\text{Re}$$

مثال (8)- يجري ماء درجة حرارته $15.6^{\circ}C$ في أنبوبة قطرها 152.4mm بسرعة 3.66m/s فما هي السرعة التي يجب أن يجري فيها زيت متوسط اللزوجية عندالدرجة $32.2^{\circ}C$ في أنبوبة قطرها 76.2mm لكي يكون الجريان في الأنبوبتين متشابهاً تحريكياً.

الحل:

إن الجريان في الأنابيب يخضع عادة لقوى اللزوجة (الاحتكاك) وقوى العطالة فقط لذلك فإن رقم رينولدز كما وجدنا منذ قليل هو الذي يعبر عن التشابه التحريكي أي:

رقم رينولدز للزيت = رقم رينولدز للماء

$$\frac{V.d}{\gamma} = \frac{V'.d'}{\gamma'}$$

من الجداول نوجد لزوجة الماء الحركية عند الدرجة $15.6^{\circ}C$ التي تساوي $1.13x10^{-6}m^2/s$ وتوجد لزوجة الزيت الحركية عند الدرجة $32.2^{\circ}C$ التي تساوي $2.96x10^{-6}m^2/s$ ومنه التعويض في علاقة تساوي رقمي رينولدز نجد:

$$\frac{3.66x152.4}{1.130x10^{-6}} = \frac{V'x76.2}{2.96x10^{-6}} \Rightarrow V' = 19.2m/\sec$$

إذاً يجب أن يجري الزيت بسرعة 19.2m/s حتى يحصل تشابهاً تحريكياً مع حركة الماء.

مثال (9)- ما هو قطر الماسورة التي يجري فيها ماء درجة حرارته $15.6^{\circ}C$ بسرعة 1.11m/s حتى يتشابه تحريكياً مع قوة الهواء والدرجة $20^{\circ}C$ في ماسورة قطرها 610mm بسرعة متوسطة قدرها 1.82m/sec.

الحل:

من الجداول نجد لزوجة الهواء $14.86x10^{-6}m^2/s$

لزوجة الماء $1.130x10^{-6}m^2/s$

حتى يتم التشابه التحريكي يكفي تساوي رقمي رينولدز في النموذج وفي الأصل:

$$\frac{1.83x610}{14.86x10^{-6}} = \frac{1.11xd}{1.130x10^{-6}} \Rightarrow d = 76.54mm$$

مثال (10)- ما هي سرعة نموذج غواصة بمقياس 1:15 يختبر في وعاء يحتوي نفس السائل الذي تسير فيه الغواصة الحقيقية بسرعة 5.36m/s لكي يتم التشابه الديناميكي؟

الحل: لكي يتم التشابه الديناميكي فإنه يكفي تساوي رقمي رينولدز:

$Re_n=Re_m$

$$\frac{5.36xf}{\gamma} = \frac{V.\frac{f}{15}}{\gamma} \Rightarrow v = 80.4m/s$$

وهي السرعة التي يجب أن يسير فيها النموذج لمي يحصل التشابه الديناميكي.

مثال (11)-يستغرق تفريـغ نموذج خزان بمقاس 1:225 اربع دقائق عن طريق فتحة فكم يستغرق تفريـغ الأصل؟

الحل:

بما أن قوى الجاذبية هي القوة الفاعلة فقط لذلك فكما وجدنا في المسألة الأولى من هذا البحث أن:

$B_a=b^{5/2}$

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \left(\frac{L_m}{L_n}\right)^{5/2}$$

لكن:

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \frac{L_m^3/T_m}{L_n^3/T_n}$$

ومنه:

$$\left(\frac{L_m}{L_n}\right)^{5/2} = \left(\frac{L_m}{L_n}\right)^3 . \frac{T_n}{T_m}$$

$$T_n = T_m\left(\frac{L_m}{L_n}\right)^{(5/2-3)} = T_m\left(\frac{1}{225}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$T_n = T_m\sqrt{225} = 4x15 = 60\min$$

مثال (12)- سفينة طولها 156.16m تتحرك على السطح بسرعة 6.83m/s عند أي سرعة يجب اختبار نموذج مشابه لها هندسياً وطوله 2.44m .

الحل:

$$b = b_v^2 \Rightarrow b_v = \sqrt{b}$$

أي أن:

$$\frac{V_m}{V_n} = \sqrt{\frac{L_m}{L_n}} \Rightarrow V_m = V_n\sqrt{\frac{L_m}{L_n}} = 6.83\sqrt{\frac{2.44}{156.16}} = 0.854m/s$$

مثال (13)- إذا كان التدفق والسرعة في نموذج بمقاس 1/36 هي $70,75.10^{-3}m^2/s$ و 0.381m/s على التوالي، فما هي القيم المقابلة في الأصل؟

الحل:

لدينا من المسألة الأولى:

$b_Q = (b)^{5/2}$

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \left(\frac{L_m}{L_n}\right)^{5/2} \Rightarrow Q_n - Q_m\left(\frac{L_m}{L_n}\right)^{2/5}$$

$$Q_n = 70.75x10^{-3}\left(\frac{36}{1}\right)^{2/5} = 550.15m^2/s$$

أما بالنسبة للسرعة فلدينا:

$$b = b_v^2$$

أو

$$\frac{L_m}{L_n} = \frac{V_m^2}{V_n^2} \Rightarrow V_n = \frac{V_m}{\sqrt{\frac{L_m}{L_n}}} = \frac{0.38}{\sqrt{\frac{1}{36}}} = 2.286m/s$$

مثال (14)- إذا كانت قوة ضغط الموج على نموذج لحائط بحري مناسبة 1:36 هي 1.2N فما هي القوة الضاغطة على الحائط الأصلي؟

الحل:

$$\frac{P_m}{P_n} = b_r.b^2$$

$$\frac{G_m}{G_n} = b_\gamma.b^3$$

بتساوي هاتين القيمتين نجد :

$$\frac{G_m}{G_n} = \frac{P_M}{P_n} = \frac{\gamma_m}{\gamma_n}\left(\frac{L_m}{L_n}\right)^2$$

وبما أن السائل المستخدم في التجربة هو السائل الأصلي نفسه لذلك $\gamma_n = \gamma_m$

$$\frac{P_m}{P_n} = \left(\frac{L_m}{L_n}\right)^3 \Rightarrow P_u = \frac{1.2}{\left(\frac{1}{36}\right)^3} = 55987N$$

مثال (15)- جسم مغمور في ماء عذب درجة حرارته $15.6^\circ C$ ينساب الماء بسرعة 2.44m/s يتعرض نموذج هذا الجسم بمقاس 1:15 وموضوع في نفق هوائي حالة الهواء فيه قياسية إلى مقاومة قدرها 20N. فما هي القوة الواقعة على الأصل عند حالة مشابهة ديناميكياً.

الحل:

نحسب سرعة التيار الهوائي من مساواة رقمي رينولدزحيث :

γ_{air}= 1.486x10^{-5}m.s γ_w= 1.130x10^{-6}m.s

$$\frac{V_n.L_n}{\gamma_n} = \frac{V'_m.L'_m}{\gamma_m}$$

لكن:

$$\Leftarrow L'_m = \frac{1}{5}.L_n$$

$$\frac{2.44.L_n}{1.136x10^{-6}} = \frac{V'_m.\frac{L_n}{5}}{1.486x10^{-5}} \Rightarrow V'_m = 160m/s$$

الآن من مقاس القوة نحصل:

$$\frac{F_m}{F_n} = \frac{\rho_m.V_m^2.L_m^2}{\rho_n.V'_n.L_n^2}$$

$$\rho_m = 1.204kg/m^3 \quad F_n = F_m \frac{\rho_n.V_n^2.L_n^2}{\rho_m.V_m^2.L_m^2}$$

$$\rho_n = 999kg/m^3 = 20\frac{999x(2.44)^2 x(5)^2}{1.20x(160)^2 x(1)^2}$$

F_n= 96.48N

الفصل الثاني
خواص الموائع

تمهيد:

يُعرَّفُ المائع ببساطة على أنه مادة تنساب أو تسيل وتكون جزيئاته في حالة حركة دائمة بالنسبة لبعضها البعض وقد تكون هذه الحركات اهتزازية أو انسحابية أو دورانية وتتصف الموائع بأنها لا تبدي مقاومة للتغير في شكلها الهندسي مهما كانت القوى الخارجية صغيرة وعادة لا تعود لشكلها الأساسي بعد إزالة القوة الخارجية ويمكن تعريف المائع بشكل علمي بالتعريف التالي :

الموائع هي مواد لا تبدي أي مقاومة لقوى القص مهما كانت هذه القوى صغيرة.

كما يمكننا أن نضيف أن الموائع تأخذ شكل الوعاء الذي يحتويها هذا يعني إن الشكل الهندسي للمائع يتحدد بفعل القوى الخارجية التي تؤثر عليها وليس بفعل قوى التماسك بين جزيئاته .

تشمل الموائع كلاً من السوائل والغازات وليس من الصعوبة التفريق بينهما فحجم السائل ثابتاً بينما حجم الغاز يتأثر بشكل كبير بالحرارة والضغط وبالعوامل الخارجية وهو يشغل الحيز الذي يوجد فيه.

2.1- مبدأ الاستمرار في البنية الجزيئية للموائع:

نستطيع اليوم بفضل ما قدمته الفيزياء من معلومات عن البنية الجزيئية للمادة أن نفسّر الاختلاف بين خواص المائع وخواص الجسم الصلب.

إن جزيئات المادة تتجاذب مع بعضها البعض طالما أن المسافة بينها أكبر من قطر الجزيء وتتحول هذه القوى إلى قوى تدافع عند اقترابها من بعضها وذلك حين تصبح المسافة بينها أصغر من قطر الجزيء.

إن جزيئات الأجسام الصلبة تتحرك بشكل دائم إلا أن حركتها محدودة جداً وهي عبارة عن اهتزازات صغيرة أما جزيئات المائع فتمتاز بحريّة حركتها وبجميع أنواع الحركة وبكافة الاتجاهات .

إن المسافة بين جزيئات الجسم السائل أصغر بكثير من المسافة بين جزيئات الجسم الغازي وبما أن كتلة الجسم تُقاس بمجموع كتل جزيئاته فإن كتلة واحدة الحجوم من الجسم السائل تكون أكبر من كتلة واحدة الحجوم للغاز.

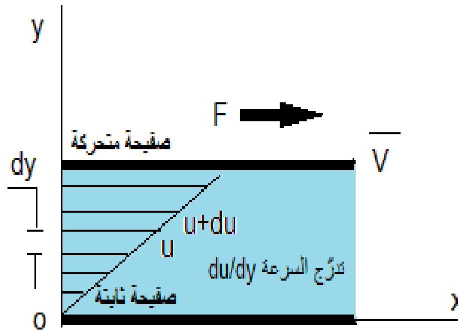
إن جزيئات المائع السائل تتحرك وفق مسارات منحنية وكلما اقتربت جزيئتان من بعضهما تولدت بينهما قوة نبذ، أما الغازات فالمسافة بين جزيئاتها كبيرة إذا ما قورنت بالأبعاد الهندسية للجزيء لذا تفترض النظرية الحركية للغازات حركة مستقيمة لجزيئات الغاز ولا يغير الجزيء من اتجاه حركته إلا حين اصطدامه بجزيء آخر أوبجسم صلب ويقال عن المسافة المقطوعة بين اصطدامين بالمسار الوسطي الحر للجزيء.

يتبين من النظرة المجهرية لبنية المادة وجود فراغات بين الجزيئات وإن الدراسة الصحيحة لحركة الموائع تستلزم دراسة مفصلة لحركة جميع الجزيئات، إلا أن الأبعاد الهندسية لهذه الجزيئات والمسافات بينها تكاد تكون خيالية بالنسبة للمهندس نظراً لصغرها المجهري.. لذلك يفترض علم الميكانيك بصورة عامة مبدأ الاستمرار في بنية المادة مهملاً بذلك المسافة بين الجزيئات ويغدو هذا الافتراض مقبولاً إذا علمنا أن حجماً لا متناهياً في الصغر يحوي على مليارات الجزيئات، فمثلاً: $1ml^3$ من الهواء يحوي $2.7x10^7$ جزيء. إن فرضية الاستمرار في بنية المادة تتطلب الاتصال المستمر دون انقطاع بين الحجوم اللامتناهية في الصغر.

2.2-اللزوجة :Viscosity

وهي من أهم الخواص الفيزيائية للسوائل وتعتبر كبصمة تعريف للسائل حيث لا يمكن أن يوجد في الطبيعة لسائلين مختلفين نفس قيمة اللزوجة عند نفس درجة الحرارة ونفس الضغط وتُعرّف على أنها مقاومة السائل للانتقال.. كما تُعرّف على أنها الخاصية التي يقاوم فيها السائل إجهادات القص وبالتالي مقاومة التغيرات في شكله.. وهي تتعلق بقوى التماسك بين جزيئات السائل أو بين العناصر المكونة للسائل.

فلو افترضنا أن سائلاً ما متوضّعاً بين صفيحتين أفقيتين السفلية ثابتة والعلوية قابلة للحركة فإذا وضعنا الصفيحة السفلية على المحور الإحداثي الديكارتي OX فإن الصفيحة الثانية ستكون فوقها على ارتفاع Y مثلاً كما يبين الشكل (2-1). فإذا تعرضت الصفيحة العليا إلى قوة مماسية $\vec{F}$



الشكل (2-1)

فإنها سوف تتحرك بسرعة وليكن $\vec{V}$ وستتحرك معها الطبقة من السائل الملتصقة بها بنفس السرعة $\vec{V}$، بينما الصفيحة السفلى المثبتة فلها السرعة صفر وكذلك الطبقة من السائل الملتصقة بها ستكون سرعتها صفراً.. ولنعتبر فرضاً أن الانتقال لطبقات السائل المتنضدة فوق بعضها بين الصفيحتين هو انتقال خطي فإن مخطط السرعة سوف يظهر كما يبين الشكل حيث يعبّر طول الشعاع عن قيمة السرعة، فلو كانت طبقة من الطبقات تتحرك بسرعة $\vec{U}$ فإن الطبقة التي تليها بالارتفاع والتي تبعد عنها للأعلى مسافة dy سوف تزداد سرعتها بمقدار du لتصبح سرعتها u+du . ولقد وُجد أن قيمة القوة تتناسب طرداً مع مساحة سطح الصفيحة ومع القيمة $\frac{du}{dy}$ الذي يسمى

تدرّج السرعة مع الارتفاع أي ستظهر العلاقة على الشكل:

$$F \sim \left[\frac{du}{dy}, A\right] \qquad (2-2-1)$$

ويمكن تحويل علاقة التناسب هذه بإدخال معامل كما يلي:

$$F = K.A.\frac{du}{dy} \qquad (2-2-2)$$

ثابت التناسب K يطلق عليه اسم اللزوجة التحريكية ويرمز له بالرمز μ لتصبح العلاقة:

$$F = \mu.A.\frac{du}{dy} \qquad (2-2-3)$$

لو قسمنا طرفي المعادلة على السطح Aسنجد:

$$\frac{F}{A} = \mu\frac{du}{dy} \qquad (2-2-4)$$

إن القيمة $\frac{F}{A}$ تسمى الاجهاد المماسي للقوة المماسية F المؤثرة على السطح A وعادة

ما نرمز للإجهاد المماسي بالرمز τ ومن الملاحظ أن له واحدة القوة مقسوماً على السطح وسيكون في الجملة الدولية مثلاً N/m^2 .. أما واحدة قياس اللزوجة μ فيمكن معرفتها من المعادلة السابقة وذلك كما يلي :

$$[\mu] = \frac{\frac{[F]}{A}}{\left[\frac{du}{dy}\right]} = \frac{\frac{[F]}{L^2}}{\frac{\frac{L}{T}}{L}} = \frac{\left[\frac{F}{L^2}\right]}{\left[\frac{L}{L.T}\right]} = \frac{[F.T]}{[L^2]} = [FL^{-2}T]$$

حيث اعتبرنا أن القوة كمية فيزيائية أساسية وستظهر في الجملة الدولية :

$$[\mu] = \frac{N.S}{m^2} \qquad (2-2-5)$$

وإذا اعتبرنا أن القوة كمية فيزيائية مشتقة، ستكون بالتالي الكتلة هي الكمية الفيزيائية الأساسية وستصبح واحدة قياس اللزوجة التحريكية μ كما يلي:

باعتبار أن القوة هي جداء الكتلة في التسارع سنجد:

$$[\mu] = [M.L^{-1}.T^{-1}]$$

وسيكون للزوجة μ قيم مختلفة حسب الجملة التي تُقاس فيها فمثلاً:

في الجملة السغثية :

$gr.m^{-1}.S^{-1}$=Cpoise سنتي بواز

$$Poise=[\mu_{cgs}]=gr.Cm^{-1}.S^{-1}$$ بواز

وفي الجملة التقنية:

$$[\mu_{Tech}]=KP.m^{-2}.S$$

وفي الجملة المكثية:

$$[\mu_{MKS}]=Kg.m^{-1}.S^{-1}$$

وفي الجملة الدولية:

$$[\mu_{SI}]=Kg.m^{-1}.S^{-1}$$

ويمكن أن نضع بسهولة العلاقة التالية لقيمة اللزوجة وارتباطها بالجمل المختلفة.

$$\mu_{cgs}=10\mu_{MKS}=98.1\mu_{Tech}=10\mu_{SI}$$

وفي الجملة البريطانية:

$$[\mu_{Br.S}]=Ib.in^{-1}.S^{-1}$$

$$=Ib_f.S.in^{-2}$$

2.2.1-اللزوجة الحركية:

وهي النسبة ما بين اللزوجة التحريكية μ وكثافة السائل ρ ويرمز لها بالرمز ν :

$$\nu=\frac{\mu}{\rho} \qquad (2-2-6)$$

ويمكن اشتقاق واحدة قياسها من العلاقة السابقة بسهولة لنجد:

$$[\nu]=\frac{[M.L^{-1}.T^{-1}]}{[M.L^{-3}]}=L^2.T^{-1}$$

وستكون بالتالي كما يلي:

$$[\nu]_{SI}=m^2/s,[\nu]_{cgs}=Cm^2/s$$

تسمى الواحد Cm^2/s في الجملة السغثية باسم الستوك (Stock)

2.2.2- طرق حساب اللزوجة:

1 - لزوجة المحاليل الملحية التي تركيزها تحت (3%):

$$\mu_{BL}=2\mu_{Water} \qquad (2-2-7)$$

2 - لزوجة المُعلّق: يعطى بالعلاقة : Suspension

$$\mu_{SuS}=\mu_K(1+4.5\phi) \qquad (2-2-8)$$

حيث :

μ_K– لزوجة الطور السائل بدون المعلّق.

ϕ -- تركيز المادة الصلبة في المعلق و هي نسبة حجم المادة الصلبة الى حجم المعلق كاملاً

3- لزوجة مستحلب (سائلين غير ممتزجين): ويعطى بالعلاقة:

$$\frac{\mu_{BL}}{\mu_c} = 1 + 2.5\phi\left(\frac{\mu_d + 0.4\mu_c}{\mu_d + \mu_c}\right) \qquad (2-2-9)$$

حيث:

μ_{BL} – لزوجة المستحلب و μ_c – لزوجة الطور المستمر و μ_d – لزوجة السائل المشتت و

ϕ - حجم الطور المشتت / الحجم الكلي.

4 - حساب لزوجة المركبات العضوية : تحسب لزوجة المركبات العضوية من العلاقة التجريبية التالية:

$$\log(\log\mu) = K.\frac{\rho}{M} - 2.9 \qquad (2-2-10)$$

حيث :

μ -هياللزوجة التحريكية في الشروط القياسية

ρ - كثافة السائل مقدراً بـ gr/Cm^3

M- الوزن الجزيئي للمركب العضوي

K– ثابت يعطى بالعلاقة :

$$K = \sum an + \sum P \qquad (2-2-11)$$

حيث:

a- عدد الذرات المتشابهة في المركب العضوي

n– ثابت الذرة

P- معامل تحويل تتعلق قيمته ببنية الذرة وبنوعية الروابط والزمر الوظيفية.

وكما يبين الجدول (2-1) والجدول (2-2) ، يمكن ان نحصل على قيم المعامل p لبعض الروابط والزمر الوظيفية وقيم ثابت الذرة n لبعض العناصر الكيميائية .

العنصر	الهدروجين	الأوكسجين	الكلور	النتروجين	البروم	اليود	الكربون
الرمز	**H**	**O**	**Cl**	**N**	**Br**	**J**	**C**
قيمة n	**2.7**	**29.7**	**60.0**	**37.0**	**79.0**	**110.0**	**50.2**

الجدول (2-1) قيم ثابت الذرة n لبعض العناصر الكيميائية

P	خواص الرابطة او الوظيفة الكيميائية	الرقم
-15.5	الحلقة الثنائية =	1
-24.0	الحلقة الخماسية ⬠	2
-21.0	الحلقة السداسية ⬡	3
-9.0	حلقة جانبية الوزن الجزيئي < 17	4
-17.0	حلقة جانبية الوزن الجزيئي > 17	5
+3.0 +1.0	Crto أو Para وضع المقررات الجانبية Meta وضع المقررات الجانبية	6
+8.0	$R_2C=CR_2$	8
+13.0	$R_2C R_2$	9
+16.0	$O=C(CH_3)-R$	10
+5.0	$R-C(=O)-CH_3$	11
+4.0	$-CH=CH-CH_2-X$ حيث X مجموعة لها وظيفة سالبة	12
+6.0	R_2CH-X حيث X مجموعة وظيفية سالبة	13
+24.7	**-OH**	14
-7.9	**-COOH**	15
-19.0	**COO-**	16
-16.4	**NO_2**	17

الجدول (2-2) قيم المعامل p لبعض الروابط والزمر الوظيفية

5- لزوجة مزيج غازي :

$$\frac{1}{\nu_{BL}} = \frac{X_1}{\nu_1} + \frac{X_2}{\nu_2} + \dots \frac{X_n}{\nu_n} \qquad (2-2-12)$$

حيث X_i– هو الكسر المولي و ν_i- هي اللزوجة الحركية لكل غاز.

كما وتوجد علاقة تجريبية ثانية لحساب لزوجة المزيج الغازي ولكنها تحسب اللزوجة التحريكية μ :

$$\mu_{BL} = \frac{\mu_1 X_1 \sqrt{M_1 T_{c1}} + \mu_2 X_2 \sqrt{M_2 + T_{c2}} + ...}{X_1 \sqrt{M_1 T_{c1}} + X_2 \sqrt{M_2 T_{c2}} + ...} \qquad (2-2-13)$$

حيث :

T_{ci}– درجة الحرارة الحرجة لكل قسم من أقسام المزيـج الغازي.

M_i– الوزن الجزيئي لكل قسم من أقسام المزيـج.

ولتبسيط الإجراءات الحسابية تدوّن قيم M و T_c في الجدول (2-2)

الغاز	M	Tc , °K	$\sqrt{M.Tc}$
Butan -n	58	426	157
النتروجين	28	126	59.2
الإيتان	30	305	95.5
البروبان	44	370	128
n - بنتان	72	470	184
n - هكسان	86	508	209.0
n – هبتان	100	540	232
الاثيلين	28	283	89.5
الميثان	16	190	55.1
الهواء	26	132	64.9
الأكسجين	32	154	70.2
الهدروجين	2	33	8.13
بخار الماء	18	646	108
ثاني أوكسيد الكربون	44	304	115.5
أول أوكسيد الكربون	28	134	61.3
الاستيلين	26	309	9.6
كبريت الهدروجين	34	373	112.6

الجدول (2-2) قيم M و T_c

2.2.3-علاقة اللزوجة مع درجة الحرارة:

تتغير لزوجة المركبات السائلة والغازية مع اختلاف درجات الحرارة ولكن توجد جداول ومخططات خاصة يمكن أن نستعين بها لمعرفة اللزوجة لكثير من المواد عند درجات حرارة مختلفة ، وبما أن الماء يعتبر سائل قياسي وهام لذلك فقد وُضعت له جداول دقيقة جداً تعطي قيم اللزوجة في كل درجات الحرارة، ونوضح في الجدول (3-2) لزوجة الماء عند درجات حرارة مختلفة ، حيث يُعطى تغير اللزوجة مع درجة الحرارة مقدرةً بالقيمة المطلقة.

Viscosity of water					
Temp (K)	**Viscosity (mN S/m2)**	**Temp (K)**	**Viscosity (mN S/m2)**	**Temp (K)**	**Viscosity (mN S/m2)**
273	1.7921	306	0.7523	340	0.4233
274	1.7313	307	0.7371	341	0.4174
275	1.6728	308	0.7225	342	0.4117
276	1.6191	309	0.7085	343	0.4061
277	1.5674	310	0.6947	344	0.4006
278	1.5188	311	0.6814	345	0.3952
279	1.4728	312	0.6685	346	0.3900
280	1.4284	313	0.6560	347	0.3849
281	1.3860	314	0.6439	348	0.3799
282	1.3462	315	0.6321	349	0.3750
283	1.3077	316	0.6207	350	0.3702
284	1.2713	317	0.6097	351	0.3655
285	1.2363	318	0.5988	352	0.3610
286	1.2028	319	0.5883	353	0.3565
287	1.1709	320	0.5782	354	0.3521
288	1.1404	321	0.5683	355	0.3478
289	1.1111	322	0.5588	356	0.3436
290	1.0828	323	0.5494	357	0.3395
291	1.0559	324	0.5404	358	0.3355
292	1.0299	325	0.5315	359	0.3315
293	1.0050	326	0.5229	360	0.3276
294	1.0000	327	0.5146	361	0.3235
295	1.9810	328	0.5064	362	0.3202
296	0.9579	329	0.4985	363	0.3165
297	0.9358	330	0.4907	364	0.3130
298	0.9142	331	0.4832	365	0.3095
299	0.8937	332	0.4759	366	0.3060
300	0.8737	333	0.4688	367	0.3027

الجدول (3-2) **لزوجة الماء مع درجة الحرارة**

ومع ذلك فهناك علاقات تجريبية أوجدها الباحثون لحساب اللزوجة عند تغير درجة الحرارة فمثلاً...

1-حساب تغير لزوجة الغازات مع درجة الحرارة:

$$\mu_t = \mu_o \frac{273+C}{T+C}\left(\frac{T}{273}\right)^{2/3} \qquad (2-2-14)$$

حيث : T– درجة الحرارة المطلقة و C – ثابت تُعطى قيمته بالعلاقة:

$$C=1.5T_V$$

حيث T_V– درجة حرارة غليان الغاز.

الجدول (4 -2) يُفيد في معرفة قيمة هذا الثابت C لعدد من الغازات الهامة في الحياة العملية:

t[°C]	C [°K]	μ_o [Cp]	الغاز
300 - 0	114	0.01706	**الهواء**
190 - 15	138	0.0187	**O_2**
100 - 15	118	0.0166	**N_2**
100 - 13	357	0.0137	**HCL**
300 - (-20)	240	0.0137	**CO_2**
100 - 15	416	0.0117	**CS_2**
100 - 16	118	0.0166	**CO**
300 - (-20)	71.7	0.0084	**H_2**
185 - (-60)	83.0	0.0084	**H_2**
100 - 13	325	0.0129	**CL_2**
100 - 15	198	0.0120	**CH_4**
184 - 15	377	0.0096	**NH_4**

الجدول (4-2) قيمة الثابت C لعدد من الغازات الهامة

2- علاقة مندلييف لحساب تغيُّر اللزوجة للسوائل مع درجة الحرارة:

وتعتمد على درجات الحرارة بشكل رئيسي لمادة مقارنة ما وغالباً ماتكون الماء ولا بد من أجل تطبيق هذه المعادلة من معرفة لزوجة المادة المدروسة عند درجتي حرارة على الأقل:

$$T_\mu = T_{\mu 1} - \frac{T_{\mu 1} - T_\mu}{K} \qquad (2-2-15)$$

حيث:

t_μ- هي درجة الحرارة التي يجب تعيين لزوجة المادة المدروسة عندها.

$t_{\mu 1}$– هي درجة الحرارة التي تكون لزوجة المادة المدروسة معروفة عندها.

$T_{\mu 1}$– هي درجة الحرارة التي تكون عندها لزوجة المادة المقارنة مساوية للزوجة المادة المدروسة.

T_μ - هي درجة الحرارة التي تكون عندها لزوجة المادة المقارنة مساوية للزوجة المادة المدروسة.

K- ثابت يحسب من العلاقة التالية:

$$K = \frac{t_{\mu 1} - t_{\mu 2}}{T_{\mu 1} - T_{\mu 2}} \qquad (2-2-16)$$

حيث:

$t_{\mu 1}$ و $t_{\mu 2}$– هي درجات الحرارة التي تكون عندها لزوجة المادة المدروسة معروفة عندها.

$T_{\mu 2}$ و -T_{μ} - هي درجات الحرارة التي تكون عندها لزوجة المادة المقارنة مساوية للزوجة المادة المدروسة عند الدرجات ($t_{\mu 2}$, $T_{\mu 1}$) .

ولتوضيح طريقة استخدام هذه المعادلة سوف نحل المثال التوضيحي التالي .

مثال:

احسب لزوجة الكحول البروبيلي النقي في الدرجات $40^{\circ}C$ و $50^{\circ}C$ و $80^{\circ}C$ إذا كانت لزوجته في الدرجة $30^{\circ}C$مساوية $\mu_{30} = 178x10^{-5} Pa.S$ وفي الدرجة $60^{\circ}C$هي $\mu_{60} = 92x10^{-5} Pa.S$.

الحل:

نعود إلى جدول لزوجة المادة المقارنة (عادةً الماء) ونوجد درجات الحرارة التي تكون عندها لزوجة الماء مساوية للزوجة الكحول البروبيلي المعطاة في نص المسألة نجد:

$T_{\mu 1}=273.3k^{\circ}$درجة الحرارة المقابلة لقيمة اللزوجة $178x10^{-5} N.S/m^2$

و $T_{\mu 2}=296.3\ k^{\circ}$ درجة الحرارة المقابلة لقيمة اللزوجة $92x10^{-5}\ N.S/m^2$.

نحسب الآن الثابت k:

$$k = \frac{30-60}{0.3-23.3} = \frac{-30}{-23} = 1.3$$

لننتبه أن 0.3 هي درجة الحرارة المئوية هي مأخوذة من 273.3 بالكلفن بعد طرح $273k^{\circ}$ وكذلك الأمر 23 هي درجة الحرارة المئوية هي مأخوذة من 296.3 بالكلفن بعد طرح $273k^{\circ}$.

الآن: نحسب درجة الحرارة الموافقة للدرجة 40° من العلاقة:

$$T_{\mu} = T_{\mu 1} - \frac{t_{\mu 1} - t_{\mu}}{k}$$

$$T_{\mu} = 0.3 - \frac{30-40}{1.3} = 8^{\circ} C = 281 k^{\circ}$$

نعود لجدول لزوجة المادة المقارنة (الماء) لنجد اللزوجة الموافقة لهذه الدرجة $281k^{\circ}$ نجدها:

$$\mu = 138x10^{-5} \frac{N.S}{m^2}$$

وكذلك الأمر بالنسبة للدرجة $50^{\circ}C$ و $80^{\circ}C$.

لابد من الإشارة إلى أن هناك مخططات خاصة أيضاً يمكن من خلالها معرفة لزوجة الكثير من السوائل والغازات وتعتمد هذه المخططات على ما يمكن تسميته إحداثيات السائل حيث أعطي لكل سائل إحداثي X وإحداثيy بجداول خاصة كالجدول (5 - 2) ومن معرفتها يمكن أن ننتقل إلى مخطط بياني كما في الشكل (2-2) لنصل بين نقطة تقاطع الاحداثيين مع النقطة التي تحددها درجة الحرارة على الشاقول في المخطط البياني وإجراء تمديد للخط الواصل بينهما لنصل إلى شاقول آخر في الجهة الثانية من المخطط تُبّت عليه قيمة اللزوجة.

NO	السائل	X	Y	الكثافة Kg/m^3
1	أسيت الألدهيد	15.2	4.8	783
2	حمض الخل تركيز 100%	12.1	14.2	1049
3	حمض الخل تركيز 70%	9.5	17.0	1069
4	بلا ماء حمض الخل	12.7	12.8	1083
5	أسيتون تركيز 100%	14.5	7.2	792
6	أسيتون 35%	7.9	15.0	948
7	أليل الكحول (Alyl Alcohol)	10.2	14.3	854
8	النشادر تركيز 100%	12.6	2.0	817
9	النشادر تركيز 26%	10.1	13.9	904
10	أميل الكحول Amyl -Alcohol	7.5	18.4	817
11	الانيلين	11.8	12.5	879
12	أميل حمض الخل	8.1	18.7	1022
13	Anisole	12.3	13.5	990
14	ثلاث كلوريد الزرنيخ	13.9	14.5	2163
15	البنزن	12.5	10.9	880
16	ملح ($C_a Cl_2$) 25%	6.6	15.9	1228
17	$N_a Cl$ 25%	10.2	16.6	1186
18	البروم	14.2	13.2	3119
19	بروم التلوين (Bromo Toluene)	20.0	15.9	1410

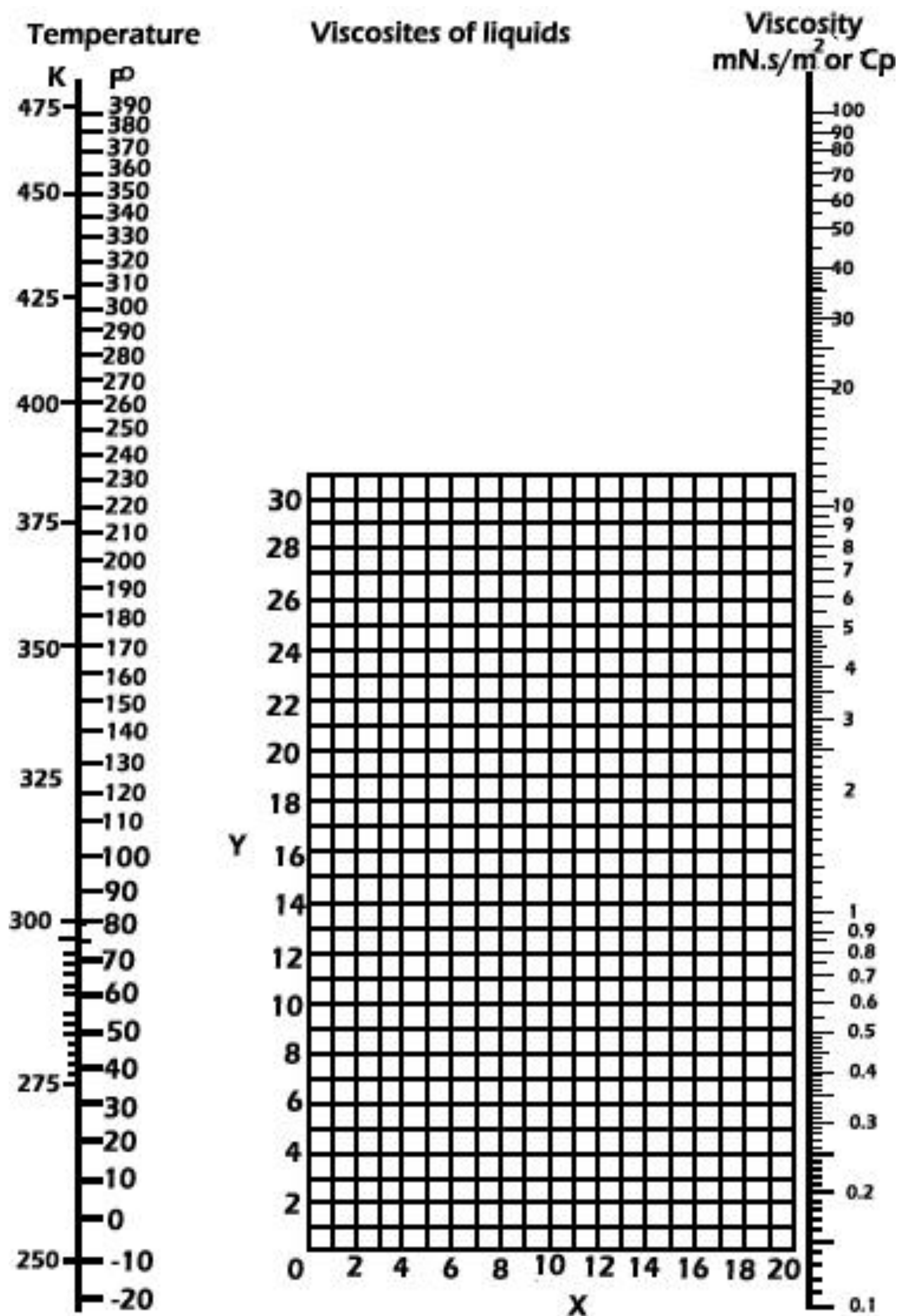
20	خلات البيوتيل (Butyl Acetate)	12.3	11.0	882
21	بيوتيل الكحول (الكحول البيوتيلي)	8.5	17.2	810
22	حمض البيوتريك	12.1	15.3	964
23	ثاني اوكسيد الكربون	11.6	0.3	1101
24	كبريتيد الكربون (CS_2)	16.1	7.5	1263
25	رابع كلور الكربون	12.7	13.1	1595
26	كلور البنزن	12.3	12.4	1157
27	كلو كلوروفورم	14.4	10.2	1489
28	كلور سولفونيك أسيد	11.2	18.1	1787
29	كلور تولوين – أورتو -	13.0	12.3	1082
30	كلور تولوين – ميتا	13.3	12.5	1072
31	كلور تولوين – بارا	13.3	12.5	1070
32	كريزول Cesol-Meja	2.5	20.8	1043
33	الكسباتول الحلفي	2.9	24.3	962
34	ثنائي بروم الإيتان	12.7	15.8	2495
35	ثنائي كلور الإيتان	13.2	12.2	1256
36	ثنائي كلور الميتان	14.6	8.9	1336
37	ثنائي أتيل الأوكزلات	11.0	16.4	1079
38	ثنائي المتيل الأوكزلات	12.3	15.8	1148
39	ثنائي الفنيل	12.0	18.3	992
40	ثنائي بروبل الأوكزلات	10.3	17.7	1038
41	خلات الإيتيل	13.7	9.1	901
42	ايتيل الكحول تركيز 100 %	10.5	13.8	789
43	ايتيل الكحول تركيز 95 %	9.8	14.3	804
44	ايتيل الكحول تركيز 40 %	6.5	16.6	935
45	ايتيل البنزن	13.2	11.5	867
46	ايتيل البروميد	14.5	8.1	1431
47	ايتيل كلوريد	14.8	6.0	917
48	ايتيل الايتير	14.5	5.3	708
49	نملات الايتيل	14.2	8.4	923
50	ايتيل اليود	14.7	10.3	1933

51	اتيلين غليكول	6.0	23.6	1113
52	حمض الفورميك (النمل)	10.7	15.8	1220
53	الفريون 11 (Ccl_3 F)	14.4	9.0	1494
54	الفريون 12 (Ccl_2 F_2)	16.8	5.6	1486
55	الفريون 21 ($CHcl_2$ F)	15.7	7.6	1426
56	الفريون 22 (CHcl F_2)	17.2	4.7	3870
57	الفريون 113 (Ccl_2 F- Ccl F_2)	12.5	11.4	1576
58	غليسيرول 100% تركيز	2.0	30.0	1261
59	غليسيرول تركيز 50 %	6.9	19.6	1126
60	هبثان	14.1	8.4	684
61	هكسان	14.7	7.0	659
62	حمض كلور الماء تركيز 31.5 %	13.0	16.6	1157
63	ايزوبيوتيل الكحول	7.1	18.0	779
64	حمض ايزوبيوتيريك	12.2	14.4	949
65	ايزوبروبيل الكحول	8.2	16.0	789
66	الكيروسين	10.2	16.9	780-820
67	زيت بذرة الكتان (Linseed Oil)	7.5	27.2	930-938
68	الزئبق	18.4	16.4	13546
69	الكحول الميتيلي تركيز 100%	12.4	10.5	792
70	الكحول الميتيلي تركيز 90%	12.3	11.8	820
71	الكحول الميتيلي تركيز 40%	7.8	15.5	935
72	خلات الميتيل	14.2	8.2	924
73	ميتيل كلوريد	15.0	3.8	952
74	ميتيل إيتيل كيتون (MEK)	13.9	8.6	805
75	نفتالين	7.9	18.1	1145
76	حمض الآزوت تركيز 95%	12.8	13.8	1493
77	حمض الآزوت تركيز 60%	10.8	17.0	1367
78	نترو بنزن	10.6	16.4	1205
79	نترو تلويين	11.0	17.0	1160
80	الاوكتان	13.7	10.0	703
81	اوكتيل الكحول	6.6	21.1	827

82	خامس كلور الايتان	10.9	17.3	1671
83	النتان	14.9	5.2	630
84	الفينول (Phenol)	6.9	20.8	1071
85	فوسفور ثلاثي البروميد	13.8	16.7	2852
86	حمض اليروبيوتيك	16.2	10.9	1574
87	فوفور ثلاثي الكلوريد	12.8	13.8	992
88	بروبيل الكحول	9.1	16.5	804
89	بروبيل البروميد	14.5	9.6	1353
90	بروبيل الكلوريد	14.4	7.5	890
91	بروبيل اليود	14.1	11.6	1749
92	الصوديوم	16.4	13.9	970
93	هيدروكسبيد الصوديوم 50%	3.2	25.8	1525
94	كلوريد القصدير (Stannic-Clorid)	13.5	12.8	2226
95	اكسيد الكبريت (SO_2)	15.2	7.1	1434
96	حمض الكبريت تركيز 110%	7.2	27.4	1980
97	حمض الكبريت تركيز 98%	7.0	24.8	1498
98	حمض الكبريت تركيز 60%	10.2	21.3	1667
99	كلوريد السلفوريل	15.2	12.4	1600
100	رابع كلور الايتان	11.9	15.7	1624
101	رابع كلور الايتيلين	14.2	12.7	1726
102	رابع كلور الثيثان	14.4	12.3	866
103	التلوين	13.7	10.4	1466
104	ثلاثي كلور الايثيلن	14.8	10.5	861-867
105	ثربنيتن Turpentine	11.5	14.9	861-867
106	فينيل الخلات	14.0	8.8	932
107	الماء	10.2	13.0	998
108	الزيلين Xylene-Ortho	13.5	12.1	881
109	الزيلين ميثا (Meta)	13.9	10.6	867
110	الزيلين بارا (Para)	13.9	10.9	861

الجدول (5 - 2) احداثيات عدد من السوائل الشهيرة

و يتم نقل احداثيات كل مادة من المواد المطلوب معرفة لزوجتها إلى مخطط كما هو في الشكل (2 -2) حيث يتم تحديد اللزوجة في درجة الحرارة المطلوبة .



الشكل (2-2) علاقة اللزوجة مع درجة الحرارة للسوائل

وكذلك الأمر : هناك جداول (6-2) ومخططات خاصة الشكل (3-2) علاقة اللزوجة مع درجة الحرارة لأنواع مختلفة من **الغازات** :

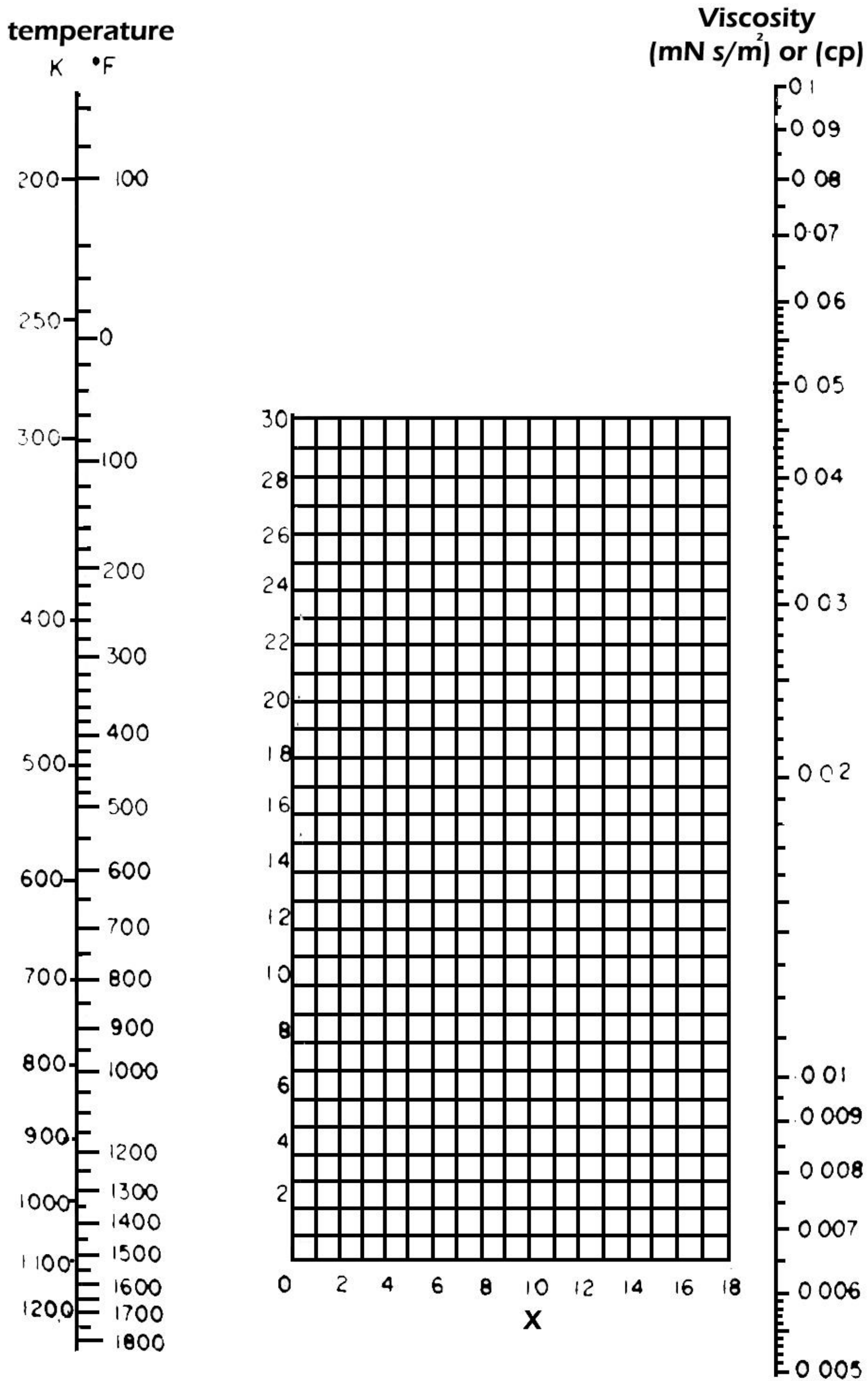
NO	**الغاز**	X	Y
1	حمض الخل	7.7	14.3
2	أسيتون	8.9	13.5
3	استيلين	9.8	14.8
4	الهواء	11.0	20.0
5	النشادر	8.4	16.0
6	البنزن	8.5	13.2
7	الأرغون	10.5	22.4
8	البيوتين	9.2	13.7
9	البيوتيلين	8.9	13.0
10	البروم	8.9	19.2
11	ثاني اوكسيد الكربون (CO_2)	9.5	18.7
12	كبريتيد الكربون (CS_2)	8.0	16.0
13	أول اوكسيد الكربون (CO)	11.0	20.0
14	الكلور	9.0	18.4
15	الكلوروفورم	8.9	15.7
16	سيانيد الهدروجين	9.2	15.4
17	الهكسان الحلقي	9.2	20.0
18	الإيتان	9.1	14.5
19	خلات الإيتيل (Ethyl Acetate)	8.5	13.2
20	اتيل الكحول	9.2	14.2
21	اتيل كلوريد	8.5	15.6
22	اتيل الايتر	8.9	13.5
23	اتيلين	9.5	15.1
24	الفلور	7.3	23.8
25	الفريون 11 (CCl_2 F)	10.3	15.1
26	الفريون 12 (CCl_2 F_2)	11.1	16.0
27	الفريون 21($CHCl_2$ F)	10.8	15.3

28	الفريون 22 ($CHCl\ F_2$)	10.1	17.0
29	الفريون 113($CCl_2\ F – CCl\ F_2$)	11.3	14.0
30	الهيليوم	10.9	20.5
31	الهكسان	8.6	11.8
32	الهدروجين	11.2	12.4
33	$3\ H_3+1\ N_2$	11.2	17.2
34	بروميد الهيدروجين	8.8	20.9
35	كلوريد الهيدروجين	8.8	18.7
36	سبانيد الهيدروجين	9.8	14.9
37	يوديد الهيدروجين	9.0	21.3
38	كبريتيت الهيدروجين	8.6	18.0
39	اليود	9.0	18.4
40	الزئبق	5.3	22.9
41	الميتان	9.9	15.5
42	ميتل الكحول	8.5	15.6
43	أوكسيد الآزوت NO	10.9	20.5
44	الآزوت	10.6	20.0
45	أوكسيد الآزوت $N_2\ O$	8.8	19.0
46	الأوكسيجين	11.0	21.3
47	بنتان	7.0	12.8
48	بروبان	9.7	12.9
49	بروبيل الكحول	8.4	13.4
50	البروبيلين	9.0	13.8
51	أوكسيد الكبريت SO_2	9.6	17.0
52	التلوين	8.6	12.4
53	2-3-3- ثلاثي ميتيل البيوتان	9.5	10.5
54	بخار الماء	8.0	16.0
55	الكينون (Xenon)	9.3	23.5

الجدول (6 - 2) احداثيات عدد من الغازات الشهيرة

وكذلك الامر يتم نقل احداثيات كل مادة من المواد المطلوب معرفة لزوجتها إلى مخطط كما هو في الشكل (3 -2) حيث يتم تحديد اللزوجة للغاز في درجة الحرارة المطلوبة .

Viscosities of gases



الشكل (3-2) علاقة اللزوجة مع درجة الحرارة للغازات

وبشكل عام تبيّن أن لزوجة السوائل تتناقص مع ارتفاع درجة الحرارة وذلك بسبب ابتعاد الجزيئات عن بعضها البعض وانخفاض قوى الترابط بين جزيئات السائل ، بينماتزداد لزوجة الغازات مع ارتفاع درجات الحرارة وذلك بسبب ارتفاع الطاقة الحركية لجزيئات الغاز وبالتالي ازدياد فرص التصادم بين جزيئاته مما يؤدي ارتفاع اللزوجة.

ولا بد من الإشارة أن لزوجة السوائل لا تتأثر كثيراً مع تغيرات الضغط بينما تنخفض لزوجة الغازات مع ارتفاع الضغط.

2.3- الكثافة:

الكثافة بالتعريف هي كتلة واحدة الحجوم لذلك يمكن أن يُطلق عليها أيضاً اسم الكتلة الحجمية ويرمز لها بالرمز ρ ومن التعريف يمكن أن نستنتج واحدة قياسها فهي كتلة مقسمة على حجم، وكذلك الأمر فالكثافة هي إحدى الخواص التي يمكن أن نميز المادة من خلالها..

ويعبّر عن الكثافة بالعلاقة التالية:

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \qquad (2-2-17)$$

وهو تعبير عن الكثافة الآنية للسائل بمعنى أنها كتلة واحدة الحجوم عندما يتناهى الحجم للصفر وبشكل عام يمكن أن نعبّر عن الكثافة بالنسبة بين كتلة المادة وحجمها أي:

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad (2-2-18)$$

حيث :

M– هي كتلة المادة وتقدر عادة بالغرام أو الكيلوغرام أو ليبرة كتلة...

V- هو حجم المادة ويقدر عادة بالسم3 أو م3 أو ليتر أو $foot^3$أو in^3 .

ومن العلاقة السابقة يمكن أن نعرف واحدة قياس الكثافة وذلك حسب جملة القياس

- ففي الجملة السغثية تعطى الكثافة بواحدة قياس gr/Cm^3
-وفي الجملة البريطانية Ib/in^3 أو Ib/ft^3
- وفي الجملة المكثية تعطى بواحدة قياس Kg/m^3
- وفي الجملة التقنية تعطى بواحدة قياس $Kp.S^2/m^4$
- أما في الجملة الدولية SIفتعطى Kg/m^3 .

ولا بد من التنويه إلى أننا قد نصادف في كثير من المراجع مفهوم الكثافة النسبية وهي قيمة عددية بلا واحدة قياس لأنها كنسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء في نفس الشروط من الضغط والحرارة ويرمز لها عادة بالرمز δ وتُعطى بالعلاقة:

$$\delta = \frac{\rho_x}{\rho_{H_2O}} \qquad (2-2-19)$$

كما يمكن أن نصادف مفهوم الوزن النوعي وهو ناتج جداء الكثافة بالجاذبية الأرضية g أي γ=ρ.g (Specific Weight) وللوزن النوعي واحدة قياس وزن منسوباً للحجم أي :

$$[\gamma]_{SI} = \frac{N}{m^3}, [\gamma]_{MKS} = \frac{Kgf}{m^3}, [\gamma]_{cgs} = \frac{dyn}{Cm^3} \qquad (2-2-20)$$

كما يمكن أن نجد ما يسمى الوزن النوعي النسبي وهو النسبة بين وزن المادة (السائل) إلى وزن الماء في نفس الشوط من ضغط وحرارة ويرمز له بالرمز (Specific Gravity)

2.3.1- **علاقة كثافة السوائل مع درجة الحرارة:**

تعطى علاقة الكثافة مع درجة الحرارة بالمعادلة التالية:

$$\rho_t = \rho_{to} - \alpha(t - t_o) \qquad (2-2-21)$$

حيث: ρ_t - هي كثافة السائل في الدرجة المطلوبة t.

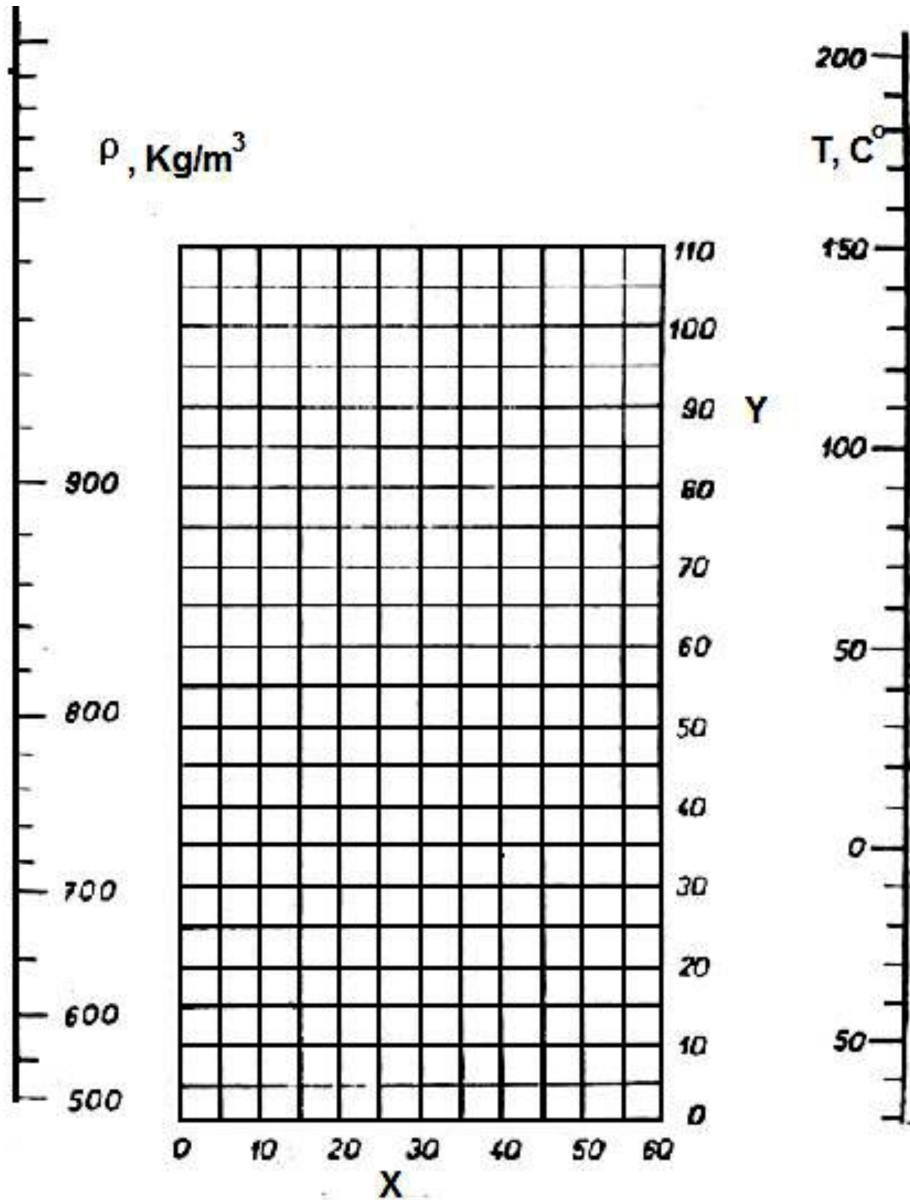
ρ_{t0} - هي كثافة السائل في الدرجة المعروفة t_o>

α - هو معامل الحرارة ويؤخذ من جداول خاصة.

كما يمكن أن نستخدم الجداول والمخططات المتوفرة لدينا والتي تعتمد على احداثيات السائل كما هو الحال في طريقة حساب اللزوجة مع درجة الحرارة ويبين الجدول (2-7) إحداثيات عدد من السوائل الشهيرة المستخدمة في الصناعة و يليه الشكل المرفق (2-4) الذي يعطي الكثافة لهذه السوائل مع درجة الحرارة .

السائل	X	Y
الاسيتون	18	48
الأمونيوم (النشادر)	12	24
الانيلين	25	93
البنزن	20	63
الايتانول	134	47
اتيل اسيتيت	27	66
اتيل الاتير	14	26
الهبتان	5	32
كلور بنزن	32	106
m - كريزول	35	90
حمض الخل	33	92
الكحول الميتيلي	17	48
ISO - بروبانول	10	47
البيريدين	27	83
التلوين	45	55

الجدول (2-7) إحداثيات عدد من السوائل الشهيرة المستخدمة



الشكل (4-2) علاقة الكثافة مع درجة الحرارة للسوائل

2.3.2-**علاقة كثافة السوائل بالضغط :**

سوف نعتبر مع قليل من التجاوز أن كثافة السوائل لا تتأثر بالضغط إلا أذا كانت الضغوط عالية جداً وهذا لا يصادف إلا نادراً في الحياة العملية.

2.3.3-**علاقة كثافة الغازات مع الضغط ودرجة الحرارة:**

على خلاف السوائل فإن الغازات تتأثر بشكل ملحوظ بتغيرات الضغط ودرجة الحرارة وبشكل عام تقسم الغازات إلى فئتين- الغازات الكاملة والغازات الحقيقية ويُعرّف الغاز

الكامل على أنه الغاز الذي تكون فيه الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت C_p والحرارة النوعية تحت حجم ثابت C_r ثابتتين وعندها يخضع الغاز إلى قانون الغازات الكاملة العام والذي يُصاغ بالشكل التالي:

$$P.V=n.R.T \qquad (2-2-22)$$

حيث أن:

P- الضغط

V- الحجم

n- عدد المولات الموجودة في الحجم V

T- درجة الحرارة المطلقة وتقدر بالكلفن k°.

R- Universal gas constant : هو ثابت الغازات العام وتختلف قيمته حسب الجملة المستخدمة للقياس.

وله القيم التالية من أجل جميع الغازات :

Value	*Units*
8.314	J/g-mole K
0.08314	liter bar/g-mole K
0.08206	liter atm/g-mole K
1.987	cal/g-mole K
10.73	psia ft^3/lb-mole °R
0.7302	ft^3 atm/lb-mole °R
1,545	ft lb_f/lb-mole °R

الجدول (8 - 2) قيم ثابت الغازات العام بحسب واحدة القياس

ولكي نطبق قانون الغازات العام دون اخطاء يجب أن يحقق الغاز الشرطين التاليين:

1- يجب أن يكون الحجم الحقيقي لجزيئات الغاز صغير جداً بالمقارنة مع الحجم الكلي للوسط.

2- قوى الجذب بين جزيئات الغاز يجب أن تكون صغيرة جداً.

وبشكل عام يمكن أن نطبق قانون الغازات العام مع بعض التعديلات من أجل الغازات ومن جهة أخرى: يمكن أن نطبق قانون الغازات العام مع بعض التعديلات من أجل الغازات الحقيقية حيث يدخل معامل إضافي للعلاقة لتصبح على الشكل التالي:

$$P.V=Z.n.R.T \qquad (2-2-23)$$

حيث : Z - يمثل عامل الانضغاطية والذي يعتبر تابعاً للضغط ولدرجة الحرارة.

وتتراوح قيمة z من قيم أقل من الواحد إلى قيم أعلى من الواحد وذلك تبعاً للضغط المطبق، فمثلاً عندما تكون الضغوط منخفضة فإن قيمة z تكون أقل من الواحد

ويكون الاختلاف عن قانون الغاز الكامل بسبب أن لقوى الجذب بين الجزيئات سيصبح لها معنى أما في الضغوط العالية فإن z سيكون أكبر من الواحد ويكون الاختلاف عن قانون الغازات الكاملة بسبب أن حجم جزيئات الغاز سيكون ذو أهمية بالمقارنة مع الحجم الكلي للوسط وفي هذه الحالة تظهر معادلة حساب كثافة الغاز بالشكل التالي:

$$\rho = \frac{P.M}{R.T} \cdot \frac{1}{z} \qquad (2-2-24)$$

حيث:

ρ - هي كثافة الغاز في الشروط (T, P)

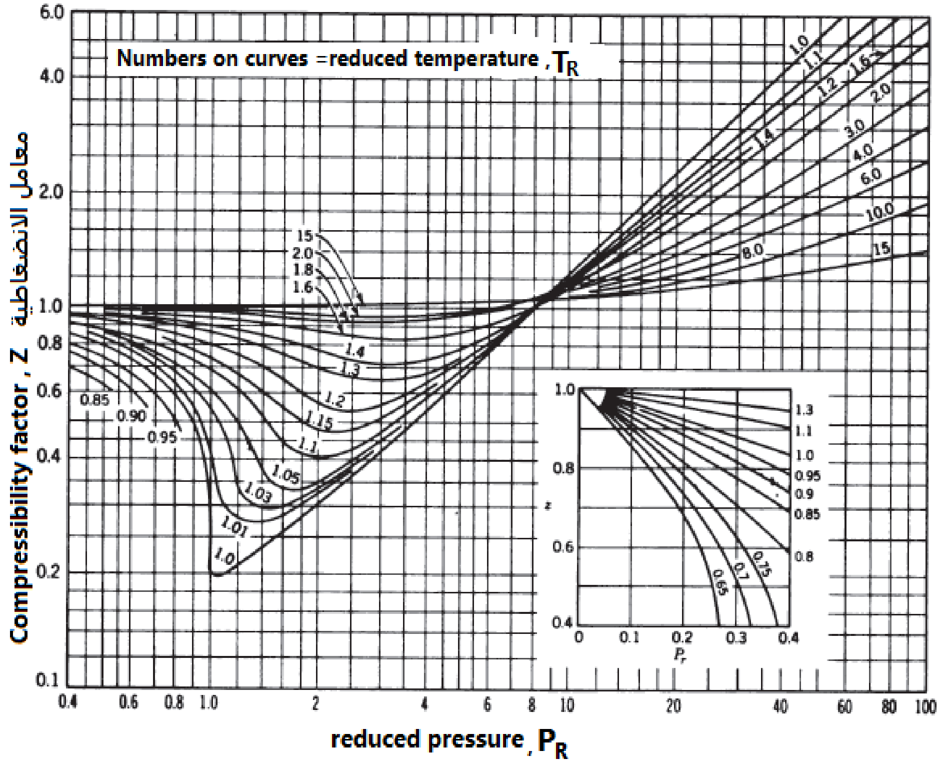
R - ثابت الغازات العام.

T- درجة الحرارة المطلقة.

M- الوزن الجزيئي للغاز.

Z- هو معامل الانضغاطية الذي يتبع لـ (T,P) .

ولكي نحدد قيمة معامل الانضغاطية Z نستخدم تابعاً تم رسمه بشكل تخطيطي و يُسمّى (The Generalized Compressibility- Factor chart)حيث يظهر هذا المخطط بالشكل التالي:



الشكل (2-5) مخطط علاقة ثابت الغازات العام مع الضغط ودرجة الحرارة

حيث تكون فيه قيمة Z تابعة لقيم درجة الحرارة المصغرة(المختزلة)T_R والضغط المصغر(المختزل)P_R حيث:

$$P_R = \frac{P}{P_c} \text{ و } T_R = \frac{T}{T_c} \qquad (2-2-25)$$

حيث:

T وP هي الضغط ودرجة الحرارة التي يتم عندها القياس.

T_c و P_c هي درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج على التوالي.

ويظهر من هذا المخطط أن الغاز يقترب من الغاز الكامل عندما P_R تصل إلى الصفر أي في الضغوط المنخفضة جداً وهذا طبيعي وذلك من أجل كل قيم درجة الحرارة.. وقد وُجد أن الضغط الحرج P_c لأغلب الغازات هو $3.0MN/m^2$ وبينما هو معروف أن الضغط الجوي هو $101.3KN/m^2$ أي أن الضغط المصغر P_R سيكون 30/101.3 أي 0.0353 وفي هذه الحالة عندما يكون الضغط منخفضاً فإن قيمة Z لا تبتعد عن الـ 1 بأكثر من 1% وكذلك الأمر من أجل درجات حرارة مرتفعة نلاحظ أن خطوط التحّار(isotherm) أفقية أي Z=1 .

2.4-عامل المرونة الحجمي:

إن زيادة الضغط على المائع سيؤدي إلى نقصان حجم المائع.و قابلية الانضغاط هذه يُعبر عنها بما يسمى معامل المرونة الحجمي للمائع.. حيث أن زيادة الضغط بمقدار dp سيؤدي إلى نقصان حجم السائل بمقدار dV أو زيادة الحجم بمقدار (-dV) فإذا كان الحجم الكلي V فإن النسبة $\frac{dP}{-dV/V}$ تسمى عامل المرونة الحجمي ويرمز له بالرمز k أي :

$$K = -\frac{dP}{dV/V} \qquad (2-2-26)$$

ومن الواضح أن واحدة قياس عامل المرونة الحجمي هي واحدة قياس الضغط.

وسنذكر على سبيل المثال أن عامل المرونة الحجمي للماء $K=20000\ Kg_f/Cm^2$.

2.5- ضغط البخار فوق السائل:

إن جميع السوائل تتبخر وفي جميع درجات الحرارة فإذا كان هذا التبخير يحدث في وعاء مغلق فإنه سيتوقف عندما يصبح ضغط البخار في الحيز الموجود فوق السائل مساوياً لقيمة متوازنة تتعلق بدرجة الحرارة ونوع السائل. تدعى هذه القيمة للضغط الذي تسببه هذه الأبخرة حينها باسم ضغط البخار المشبع فلو سحبنا جزءاً من هذا البخار سيتبخر من السائل قسماً جديداً يعوّض الذي تم سحبه والعكس صحيح أيضاً فلو أدخلنا بخاراً إلى هذا الحيز فإن جزءاً من الأبخرة سوف يتكاثف أي أن ضغط البخار المشبع قيمة ثابتة عند درجة حرارة ثابتة ومن الطبيعي أنه سيختلف عند اختلاف

درجة الحرارة. وكما هو معلوم فإنه عندما يتساوى الضغط المطبق على السائل مع ضغط البخار للسائل أي (الضغط الذي يحدث عنده التبخير) يحدث الغليان.. وعلى العكس فإذا حصل انخفاض في الضغط أثناء جريان السائل فإن السوائل تتحول إلى أبخرة ويحصل ما يسمى حادثة التكهف Cavitation.. وهذه الحادثة تسبب أضراراً بالغة في المنشآت المائية كالمضخات و العنفات حيث تؤدي إلى تآكل الأجزاء المعدنية وتحطّم أجزاء أخرى نتيجة عملية الطرق التي يمكن أن تحصل ولكلّ سائل ضغط بخار مشبع فمثلاً يُعطي الجدول (9 - 2) ضغط بخار الاشباع لبعض السوائل وذلك في درجة الحرارة 20 درجة مئوية :

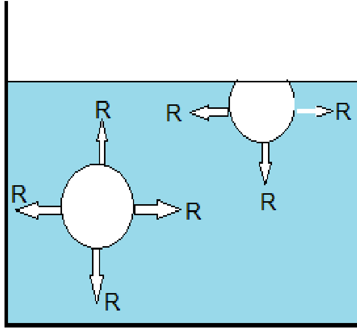
السائل	P [Torr]
الاسيتون	184.8
كلوروفورم	159.6
الكحول الميتيلي	96.0
رابع كلور الكربون	91.0
البنزن	74.66
الكحول الايتيلي	43.9
الماء	11.7
الزئبق	0.00122

الجدول (9 – 2) ضغط بخار الاشباع لبعض السوائل وذلك في درجة الحرارة 20 درجة مئوية

2.6-الشد السطحي والخاصية الشعرية:

تمتاز الموائع وخاصة السوائل منها بخاصية التماسك بين جزيئاتها وخاصية الالتصاق بين هذه الجزيئات والجدران المحيطة بها. حيث أن خاصية التماسك تجعل السائل يقاوم إجهادات الشد عليه أما خاصية الالتصاق فتجعل السائل قادراً على الالتصاق بالسطوح المجاورة.. أما الشد السطحي فما هو إلا تماسك بين جزيئات السائل على السطح الحر له. فالجزيء الموجود داخل السائل يكون معرضاً لقوى جذب متوازنة فيما بينها، بينما يكون لهذه القوى محصلة حين يكون الجزيء على السطح الحر كمايوضح الشكل (6-2) هذا يعني أنه لإيصال جزيء إلى السطح الحر لا بدمن قدرة تعمل ضد قوى الشد السطحي المذكور، لذلك يعتبر تشكل السطح الحر لسائل معين بمثابةبذل قدرة معينة تتحول إلى قدرة كامنة للجزيئات الموجودة على السطح الحر.
فزيادة السطح الحر تتطلب زيادة في الطاقة الكامنة .
الأجسام تتوضّع بحيث تكون طاقتها الكامنة بحدودها الصغرى ، لذلك نجد أن قطرة الماء تأخذ شكلاً كروياً فيما لو وضعت على سطح مستوٍ وذلك لأن للشكل الكروي

أصغر سطح خارجي من أجل حجم معين وبالتالي أقل طاقة ممكنة. وهنا نعرف وحدة الشد السطحي في السوائل بأنها العمل اللازم بذله لتشكيل وحدة السطوح من السطح الحر للسائل وعليه فإن هذه العلاقة تتناسب طرداً مع مساحة السطح الحر فإذا كانت الطاقة E والمساحة A نكتب:



الشكل (2-6)

$$E \sim A \Rightarrow E = K.A \qquad (2-2-27)$$

ثابت التناسب هنا هو ما يطلق عليه معامل الشّد السطحي ويرمز له بالرمزσ ولكي تكون المعادلة السابقة صحيحة فيزيائياً يجب أن يكون لهذا الثابت واحدة قياس باعتبار أن واحدة الطاقة هي N.m وواحدة السطح هي m^2 وبالتالي :

$$\sigma = \frac{E}{A} \text{ أو } \frac{N.m}{m^2} = \frac{N}{m}$$

من هذه المناقشة يتبين أن معامل الشد السطحي ما هو إلا قوة منسوبة إلى طول. و اذا رمزنا لقوة الشّد السطحي بالرمزRوالطول هنا ما هو إلا طول محيط السطح الحر ، يمكن أن نكتب:

$$R = \sigma.L \qquad (2-2-28)$$

حيث : R - قوة الشد السطحي و L– محيط سطح الفصل و σ - معامل الشّد السطحي.

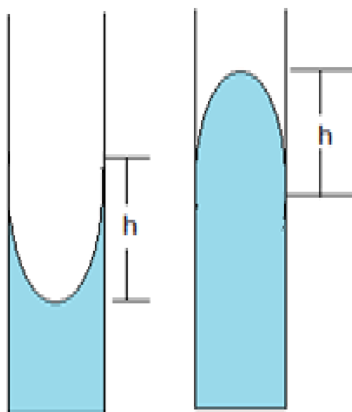
وبنفس السياق لو راقبنا سائلاً موجوداً في أنبوب شعري نلاحظ أن السطح الحر للسائل لن يقع في مستوي أفقي واحد، فبعض السوائل ترتفع صاعدة على جدران الأنبوب الشعري وتسمى سوائل مبللة، وبعضها الأخر ينخفض من الجوانب وتسمى سوائل غير مبللة ، وتفسر هذه الظاهرة بالعودة إلى خاصيتي التماسك والالتصاق فبالعكس ولمعرفة مقدار التسلق أو الهبوط الشعري يجب أن نعرف أن لقوة الشد السطحي الدور الأساسي في تحديد مقدار هذا الارتفاع وذلك عندما يتم التوازن بين هذه القوى و وزن السائل المتسلق ، فإذا افترضنا أن هذا الارتفاع h كما في الشكل (2-5) فإن وزن السائل المتسلق سيكون :

$$\left(\pi \frac{d^2}{4} .h.\rho.g \right)$$

باعتبار أن d هو قطر الأنبوب الشعري أما قوة الشد السطحي R=σ.L حيث $L = 2\pi.\frac{d}{2}$ هو محيط الأنبوب الشعري.. وعند حالة التوازن نجد:

$$\pi\frac{d^2}{4}\rho gh = \sigma.2\pi\frac{d}{2} \Rightarrow$$

$$h = \frac{4\sigma}{\rho gd} = \frac{2\sigma}{\gamma.r} \qquad (2-2-29$$



الشكل (2-7)

وهو مقدار الهبوط أو الارتفاع الشّعري .

ونبيّن في الجدول (10 – 2) التوتر السطحي لبعض السوائل الشائعة الملامسة للهواء عند الدرجة 20درجة مئويّة :

$\sigma[N/m] = \sigma\left[dynes/Cm\right]10^{-2}$	**السائل**
0.436	الزئبق
0.02370	الاسيتون
0.02885	البنزن
0.02695	رابع كلوريد الكربون
0.02275	الكحول الايتيلي
0.01843	n- الهكسان (الخطي)
0.02035	n- الهبتان
0.02261	الكحول الميتيلي
0.0282	التلوين
0.07275	الماء

الجدول (10 – 2) التوتر السطحي لبعض السوائل الملامسة للهواء عند الدرجة 20درجة مئويّة

الفصل الثالث

سكون السوائل –الهيدروستاتيك

تمهيد :

لدراسة سكون السوائل لابد من معرفة القوى المؤثرة على الجسم السائل وقد وُجد أن هناك نوعين من القوى المؤثرة على الجسم السائل الساكن وهي :

1- قوى الكتلة:

وتسمى أيضا قوى الحجم ، وقد أطلق عليها هذا الاسم لأنها تؤثر على كامل حجم السائل مثل قوى الثقالة والقوى الكهروطيسية وغيرها وعادة ما يتم التعبير عنها باستخدام مفهوم نهاية نسبة الشعاع الرئيسي لقوى الكتلة إلى كتلة الجسم وذلك عندما تتناهى هذه الكتلة إلى الصفر :

$$F = \lim_{\Delta m \to 0} \frac{\Delta F'}{\Delta m} \qquad (3-1)$$

وتسمى هذه النسبة بكثافة شعاع قوى الكتلة ومن الملاحظ أن لكثافة شعاع قوى الكتلة واحدة قياس التسارع أي m/s^2 في الجملة الدولية وعادة ما يتم التعبير عن كثافة شعاع قوى الكتلة وسطيا بالشكل التالي:

$$F = \frac{\Delta F'}{\Delta m} \quad \text{أو} \quad F = \frac{\Delta F'}{\rho.\Delta V} \qquad (3-2)$$

حيث:

F : هو شعاع كثافة قوى الكتلة

$\Delta F'$: التغير الوسطي لقوى الكتلة

Δm: هو التغير الوسطي للكتلة

2- قوى السطح :

وهي تؤثر فقط على الجزيئات السطحية للسائل فقط ويتم التعبير عنها عادة بما يسمى بإجهادات قوى السطح وهي النسبة بين قوى السطح إلى مساحة السطح عندما يتناهى هذا السطح إلى الصغر أي :

$$p = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \qquad (3-3)$$

حيث :

ΔP :هي قوى السطح وتتعلق باتجاه المساحة ΔA

P :هي إجهاد قوى السطح وله واحدة قياس الضغط أي قوة / سطح .

3.1-الضغط الهيدروستاتيكي (الضغط الساكن) :

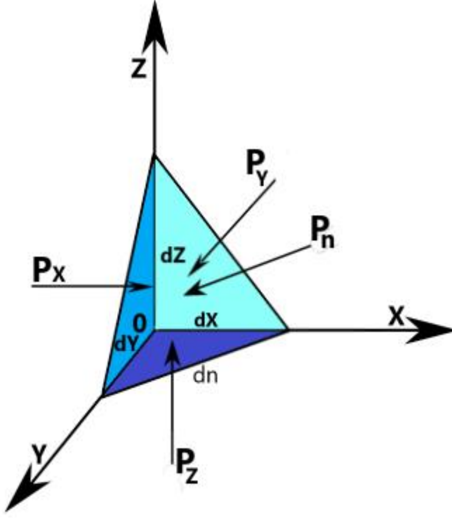
لنأخذ حجما عنصريا من سائل على شكل هرم أسطحه متوضعة على المستويات الأحداثية الديكارتية كما في الشكل (3 – 1) طول أحرفه dz ,dy , dx ولتكن مساحة هذه السطوح كما يلي :

السطح المتعامد مع ox نسميه Ax

والسطح المتعامد مع oy نسميه Ay

والسطح المتعامد مع oz نسميه Az)

1 - قوى الحجم تهمل لأنها تتناسب مع جداء الابعاد الثلاثة $dz.dy.dx$ وهي قيمة صغيرة أمام قوى السطح .



الشكل (3 – 1)

2- تبقى قوى السطح والتي يُعبر عنها بإجهادات قوى السطح Px , Py, Pz, Pn إن كل هذه القوى تؤثر بشكل ناظمي على السطوح المقابلة لها :

$Px = p_n \cos(n, ox)$ القوى السطحية بالإتجاه ox

$p_y = p_n \cos(n, oy)$ القوى السطحية بالإتجاه oy

$Pz = p_n \cos(n, oz)$ القوى السطحية بالإتجاه oz

بالقسمة على السطوح المؤثرة عليها قوى السطح نجد أن الضغوط على السطوح المقابلة p هي:

$$\left\{ \begin{aligned} px &= \frac{Px}{Ax} = \frac{Pn}{Ax} . \cos(n, ox) \\ py &= \frac{Py}{Ay} = \frac{Pn}{Ay} . \cos(n, oy) \\ pz &= \frac{Pz}{Az} = \frac{Pn}{Az} . \cos(n, oz) \end{aligned} \right\} \qquad (3-4)$$

إن المساقط *Ax , Ay , Az* هي مساقط للمساحة *An* لذلك نجد :

$$\left\{ \begin{aligned} px &= \frac{Px}{Ax} = \frac{Pn\,.\cos(n,ox)}{An\,.\cos(n,ox)} = \frac{Pn}{An} \\ py &= \frac{Py}{Ay} = \frac{Pn\,.\cos(n,oy)}{An\,.\cos(n,oy)} = \frac{Pn}{An} \\ pz &= \frac{Pz}{Az} = \frac{Pn\,.\cos(n,oz)}{An\,.\cos(n,oz)} = \frac{Pn}{An} \end{aligned} \right\} \qquad (3-5)$$

وعليه فإن:

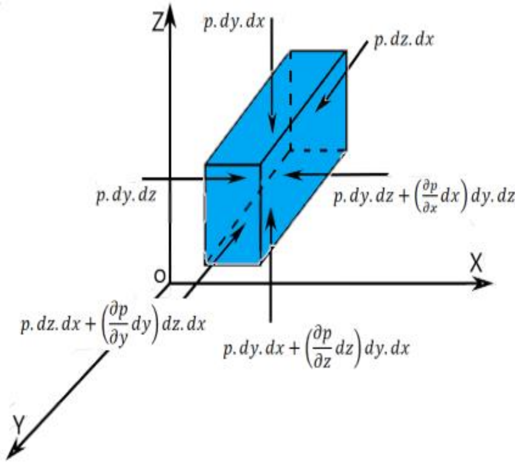
$$p_x = p_y = p_z = p_n \qquad (3-6)$$

نستنتج : في المائع الساكن قيمة اجهادات قوى الضغط الساكن لا تتعلق باتجاه السطح المطبق عليه هذه عبارة (باسكال) و التي صاغها على الشكل التالي :

الضغط على سطح سائل ساكن والمُسبب من قوى خارجية ينقله هذا السائل بشكل متساوي بكل الاتجاهات.

3.2-المعادلة الأساسية في سكون السوائل (شروط التوازن):

إن المعادل الأساسية هي المعادلة التي تربط قوى الضغط في نقطة ما مع قوى الكتلة فليكن ضمن المحاور الاحداثية حجما على شكل متوازي مستطيلات أطوال أحرفه dx ,dy ,dz كما في الشكل (2 – 3) تؤثر على هذا الحجم قوى الكتلة: Fy,Fx وFz وتؤثر قوى الضغط في الاتجاه ox :



الشكل (2 - 3)

$$p.dy.dz + \left(\frac{\partial p}{\partial x}dx\right)dy.dz \quad \text{و} \quad p.dy.dz$$

ولكي يكون هذا الحجم في حالة توازن يجب أن تكون محصلة القوى في كافة الاتجاهات مساوية للصفر.

1- في الاتجاه ox :

$$\left[p-\left(p+\frac{\partial p}{\partial x}dx\right)\right]dydz+Fx.p.dx.dy.dz=0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}\,dx.dy.dz+Fx.\rho.dx.dy.dz=0$$

(1)------- $\rho.\mathrm{Fx}=\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x}}$ أو $\mathrm{Fx}\,.\,\mathrm{dx}=\frac{1}{\rho}.\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x}}$

وبنفس المناقشة للمحاور الأخرى

في الاتجاه oy :

(2)------ $\rho.\mathrm{Fy}=\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x}}\rightarrow \mathrm{Fy}\,.\,\mathrm{dy}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{y}}.\mathrm{dy}$

في الاتجاه oz:

(3)------ $\rho.\mathrm{Fz}=\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}\rightarrow \mathrm{Fz}\,.\,\mathrm{dz}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}.\mathrm{dz}$

بجمع هذه المعادلات الثلاث نجد :

$$\mathrm{Fx.dx}+\mathrm{Fy.dy}+\mathrm{Fz.dz}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x}}.\mathrm{dx}+\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{y}}.\mathrm{dy}+\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}.\mathrm{dz}\right)\quad(3-7)$$

إن الطرف الأيمن هو تفاضل لP بالنسبة ل x, y, z

$$\mathrm{Fx.dx}+\mathrm{Fy.dy}+\mathrm{Fz.dz}=\frac{1}{\rho}\,\mathrm{dp}\qquad(3-8)$$

تدعى هذه المعادلة بالمعادلة الأساسية في الهيدروستاتيك

يمكن التعبير عن الطرف الأيسر أيضا بتفاضل كلي لتابع اشتق منه وليكن هذا التابع Ø حيث يطلق على Ø اسم كمون التابع:

$\frac{\partial Ø}{\partial \mathrm{x}}=\mathrm{Fx}$ و $\frac{\partial Ø}{\partial \mathrm{y}}=\mathrm{Fy}$ و $\frac{\partial Ø}{\partial z}=Fz$

ومنه : $\frac{\partial Ø}{\partial \mathrm{x}}\mathrm{dx}+\frac{\partial Ø}{\partial \mathrm{y}}\mathrm{dy}+\frac{\partial Ø}{\partial \mathrm{z}}\mathrm{dz}=\frac{1}{\rho}\mathrm{dp}$

او $\mathrm{d}Ø=\frac{1}{\rho}\mathrm{dp}\qquad(3-10)$

ومنه النتيجة النهائية :

(يكون المائع في حالة توازن إذا كان لقوى كتلة المؤثرة عليه كمون)

3.3- سطوح تساوي الضغط:

لدينا من العلاقة $(3-8)$:

$$\mathrm{Fx.dx} + \mathrm{Fy.dy} + \mathrm{Fz.dz} = \frac{1}{\rho}\,\mathrm{dp}$$

عند تساوي الضغط p= const فإن dp=0 ومنه

$$\mathrm{Fx.dx} + \mathrm{Fy.dy} + \mathrm{Fz.dz} = 0 \qquad (3-11)$$

او $d\Phi = 0$ وهي تسمى أيضا سطوح تساوي الكمون او سطوح تساوي المستوي وهذه السطوح تتمتع بخاصيتين:

1. سطوح تساوي الضغط متوازية لا تتقاطع مع بعضها البعض
2. قوى الكتلة الخارجية تتجه دوما وفق الناظم على هذا السطح .

3.4- توازن السوائل في حقل الجاذبية الأرضية:

اذا اعتبرنا أن كل القوى المؤثرة على السائل مساوية للصفر ماعدا قوى الجاذبية أي:

Fx=0 و Fy=0 بينما Fz=-g

بالتعويض في المعادلة الأساسية في توازن السوائل سنجد:

$$\mathrm{Fx.dx} + \mathrm{Fy.dy} + \mathrm{Fz.dz} = \frac{1}{\rho}\,\mathrm{dp}$$

$$-\mathrm{gdz} = \frac{1}{\rho}\,\mathrm{dp} \rightarrow \mathrm{dp} = -\rho\mathrm{gdz}$$

بالمكاملة نجد :

$$p = -\rho g z + c \qquad (3-12)$$

لتحديد قيمة الثابت c نعود للشروط الحدية كما يوضح الشكل (2 - 3) وهي عادة السطح الحر للسائل حيث يكون $Z=Z_0$: ويكون $P=P_0$ بالتعويض نجد :

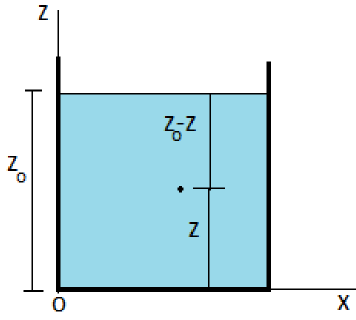
$$p_0 = -\rho g z_0 + c \rightarrow c = p_0 + \rho g z_0$$

نعوض قيمة c فنجد :

$$p = -\rho g z + p_0 + \rho g z_0 \; p$$
$$= p_0 + \rho g (z_0 - z)$$

أو:

$$p = p_0 + \rho g \Delta z \qquad (3 - 13)$$



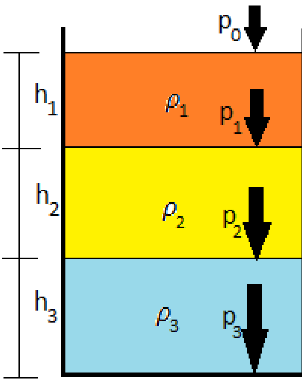
الشكل (3 - 3)

أي أن الضغط في أي نقطة من سائل ساكن يخضع لقوة الجاذبية الأرضية يساوي الضغط المطبق على السطح الحر لهذا السائل مضافا له وزن عمود السائل من السطح الحر وحتى تلك النقطة . هذا القانون صالح من أجل السوائل المتنضدة فوق بعضها البعض أيضا كما يوضح الشكل (4- 3

$$p_1 = p_0 + \rho_1 g h_1$$
$$P_2 = P_0 + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2$$
$$P_2 = P_1 + \rho_2 g h_2$$
$$P_3 = P_0 + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 + \rho_3 g h_3$$

وهكذا .....

$$P_3 = P_2 + \rho_3 g h_3 \qquad (3 - 14)$$



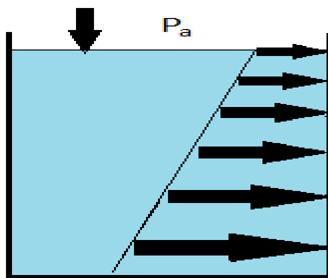
الشكل (3 - 4)

3.5المخطط البياني للضغط وعلاقة الضغط بالعمق:

يمكن رسم مخطط بياني لتوضيح الضغط وتزايده من السطح الحر للسائل نحو الأسفل وذلك يظهر في حالات مختلفة:

1- السطح الحر يمكن أن يظهر مخطط الضغط البياني كما يوضح الشكل (3 - 5) ويكون تزايد الضغط :

$$P = P_a + \rho g h \qquad (3 - 15)$$

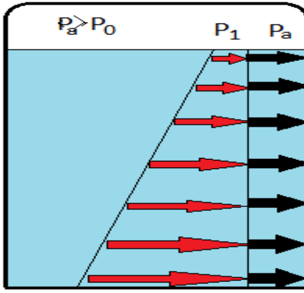


الشكل (3 - 5)

2- اذا كان الوعاء مغلق والضغط المطبق على السطح الحر أكبر من الضغط الجوي $P_0>P_a$ فان المخطط البياني للضغط سوف يظهر كما يوضح الشكل (3 - 6) ، ويكون تزايد الضغط :

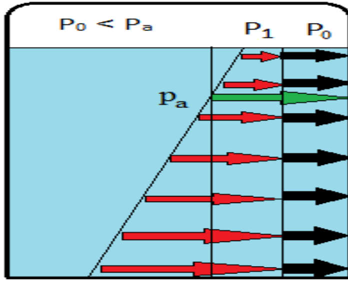
$$P_1 = P_0 + \rho gh$$

$$P_0 = P_a + P_1 \qquad (3-16)$$



الشكل (3 - 6)

3- اذا كان الوعاء مغلقا والضغط المطبق على السطح الحر اقل من الضغط الجوي $P_0<P_a$ فان المخطط البياني للضغط سوف يظهر كما يبين الشكل (3 – 7 آ)

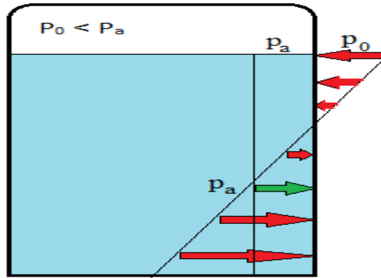


الشكل (3 – 7 آ)

$$p = p_0 + \rho gh$$

$$P_0 = P_a - P_1 \qquad (3-17)$$

كما يمكن للمخطط البياني للضغط أن يظهر بشكل اخر كما هو واضح على الشكل (3 – 7 ب)



الشكل (3 – 7 ب)

3.6-التوازن النسبي لسائل في حقل الجاذبية الأرضية:

يُقصد بالتوازن النسبي حركة الأوعية أو الخزانات التي تحوي على سائل أو غاز مائع كصهاريج نقل السوائل وناقلات النفط والطوارد المركزيّة و غيرها .

وعند دراسة التوازن النسبي للسائل يتم البحث في مسألتين:

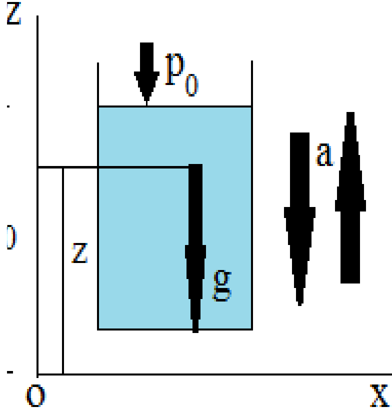
أ- تحديد شكل سطوح تساوي الضغط وهذا يعتمد على المعادلة $d\Phi=0$

ب- تحديد طبيعة توزع الضغط وهذا يعتمد على المعادلة $d\Phi=\frac{1}{\rho}\,dp$

3.6.1-حركة الوعاء شاقولياً (نحو الأعلى او الأسفل):

عندما يتحرك الوعاء الحاوي على السائل للاعلى او للاسفل كما في الشكل (3 - 8) وبتسارع قدره a فلتحديد :

أ- شكل سطوح تساوي الضغط:



الشكل (3 - 8)

نبدأ من العلاقة :

$$d\Phi = 0$$

$$Fx.dx + Fy.dy + Fz.dz = 0$$

Fz=-g و Fy=0 و 0 Fx=

فعندما يتحرك الوعاء نحو الأعلى فإن :

$$Fz = -g - a \qquad (3 - 18)$$

أما عندما يتحرك الوعاء نحو الأسفل سيكون :

$$Fz = -g + a \qquad (3 - 19)$$

وبتطبيق المعطيات السابقة نجد:

$$(-g \pm a)dz = 0$$

بالمكاملة :

$$(-g \pm a)z = const \qquad (3 - 20)$$

فعندما : $\leftarrow g \neq a$ $dz = 0$ أو Z=const

أي ان سطوح تساوي الضغط هي سطوح افقية .

ب - طبيعية توزع الضغط :

نبدأ من العلاقة: $dp = \rho d\emptyset$

$$dp = \rho(Fx.dx + Fy.dy + Fz.dz)$$

Fz=±a و Fy=0 Fx=

$$dp = \rho(-g \pm a)dz \qquad (3 - 21)$$

بالمكاملة نجد :

$$p = \rho(-g \pm a)z + c \qquad (3-22)$$

لتحديد الثابت نعود للشروط لحدية على السطح الحر للسائل : حيث $z=z_0$ و $p=p_0$

$$P_0 = \rho(-g \pm a)Z_0 + c$$

$$c = p_0 - \rho(-g \pm a)Z_0$$

بالتعويض نجد :

$$P = \rho(-g \pm a)z + P_0 - \rho(-g \pm a)Z_0$$

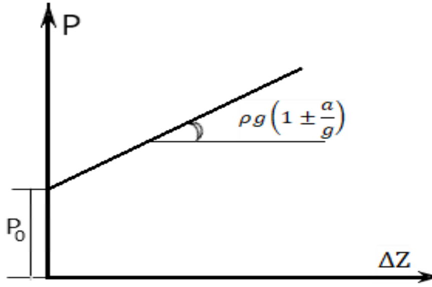
$$P = P_0 + \rho(-g \pm a)(Z - Z_0)$$

$$P = P_0 + \rho g\left(1 \pm \frac{a}{g}\right)(Z_0 - Z) \qquad (3-23)$$

ان القيمة $\rho g\left(1 \pm \frac{a}{g}\right)$هي قيمة ثابتة ولتكن k لتصبح العلاقة :

$$P = P_0 + k\Delta z \qquad (3-24)$$

من هذه المعادلة يتبين ان توزع الضغط عند الحركة الشاقولية لوعاء يحوي سائل يخضع لقانون خطي ويزداد الضغط كلما ازداد العمق وفق الخط البياني *المبين في* الشكل (3 - 9)



الشكل (3 - 9)

3.6.2- حركة الوعاء افقياً:

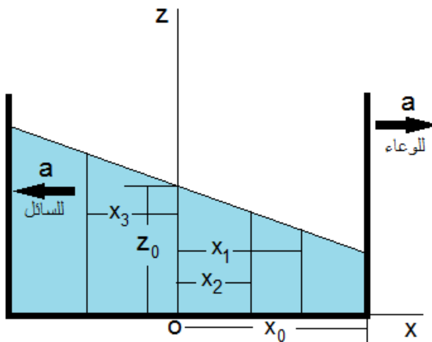
أ- شكل سطوح الضغط :

dΦ=0

ان السائل قبل الحركة ذو سطح افقي وعند حركة الوعاء بتسارع *a* فان السائل يرتد بالاتجاه المعاكس بنفس التسارع لنحدد شكل سطوح تساوي الضغط وطبيعة توزعه .

$F_x=-a$و $F_y=0$و $F_z=-g$

بالتعويض :



الشكل (3 - 10)

$$-\mathrm{adx} - \mathrm{gdz} = 0 \qquad (3-25)$$

بالمكاملة

$$\mathrm{ax} + \mathrm{gz} = \mathrm{const} \qquad (3-26)$$

$$z = \frac{c - ax}{g}$$

$$z = c` - \frac{a}{g}x \qquad (3-27)$$

ومن هذه المعادلة يتضح أن سطوح تساوي الضغط سطوح مائلة وميلها $\left(-\frac{a}{g}\right)$

ب - طبيعة توزع الضغط:

$$dp = \rho d\emptyset$$

Fx=-a و Fy=0 و Fz=-g

$$dp = \rho(-adx - gdz) \qquad (3-28)$$

بالمكاملة عند الشروط الحدية : $x=x_0$ و $z=z_0$

$$P = P_0 + \rho a(x_0 - x) + \rho g(z_0 - z) \qquad (3-29)$$

ان الحد $P_0 + \rho a(x_0 - x)$ من الطرف الأيمن من المعادلة من اجل نفس الشاقول الذي يبعد عن المحور x_0-x' (نقاط هذا الشاقول من الأعلى الى الاسفل) ذو قيمة ثابتة لذلك تظهر المعادلة من اجل شاقول ما :

$$P = P`_0 + \rho g(z_0 - z) \qquad (3-30)$$

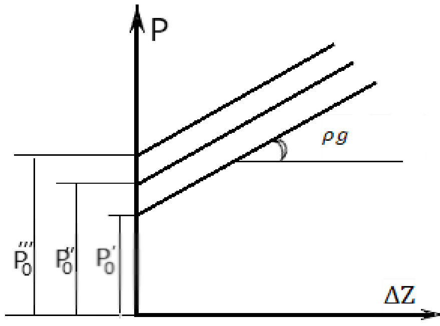
اذا اخذنا شاقول ثاني فإن $(x_0 - x")$ ستختلف وذلك حسب بعدها عن المحور ولكن من اجل هذا الشاقول الجديد فهي قيمة ثابتة لكل النقاط في الشاقول وتشكل القيمة :

$$P_0 + P_a(x_0 - x")$$

ثابت جديد $P"_0$ و تصبح المعادلة:

$$P = P"_0 + \rho g(z_0 - z) \qquad (3-31)$$

وهكذا من اجل كل مسافة عن المحور OZ باتجاه اليمين واليسار و كل هذه العلاقات تعطي ان توزع الضغط يخضع لقانون خطي ويزداد من الأعلى نحو الأسفل ولكن يختلف من شاقول الى آخر. كما يبين المخطط البياني كما في الشكل



الشكل (3 - 10)

3.6.3- وعاء يدور حول محوره بسرعة زاوية ω :

أ – شكل سطوح تساوي الضغط :

ليكن الوعاء الاسطواني الشكل ذو القطر 2r ويدور حول محوره بسرعة زاوية ω ذات قيمة ثابتة كما في الشكل (3 - 11) ، عندما يكون السائل ساكنا أي الوعاء ساكنا فان السطح سوف يكون افقيا ، ولكن عند الدوران فان السائل سوف يتحرك باتجاه الجدران نتيجة قوى الطرد المركزي وعندها سوف يتعرض أي جزيء من جزيئات السائل وليكن الجزيء M سوف يتعرض الى قوتين :

1. **قوة الجاذبية الأرضية (الثقالة) dF_g :** وهي قوة شاقولية تتجه للأسفل بعكس المحور oz وستكون قيمتها الكلية : $F_g = -g.dz$
2. **قوة الطرد المركزي نتيجة الدوران بالسرعة ω :** فاذا كان الجزيء M يبعد عن المحور oz مسافة r سيكون قيمة هذه القوة $F_h = \omega^2 \times r$

لهذه القوة مركبتان :

باتجاه ox :

$$F_x = \omega^2.r\cos\alpha = \omega^2 x$$

وباتجاه oy :

$$F_y = \omega^2.r\sin\alpha = \omega^2 y$$

بالتعويض بالمعادلة الأساسية في توازن السوائل

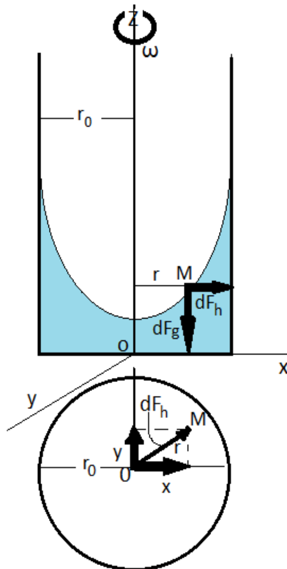
$$Fx.dx + Fy.dy + Fz.dz = 0$$

لتحديد شكل سطوح تساوي الضغط:

$$\omega^2.x.dx + \omega^2.y.dy - gdz = 0$$

$$\omega^2(xdx + ydy) - gdz = 0$$

$$\omega^2(r.dr) - gdz = 0$$



الشكل (3 - 11)

بالمكاملة نجد :

$$\omega^2 \frac{r^2}{2} - gz = const \qquad (3-32)$$

هذه المعادلة تعبر عن معادلة قطع مكافئ دوراني حول محور التناظر oz وبالتالي فإن شكل سطوح تساوي الضغط هي على شكل قطوع مكافئة دورانية .

ب - طبيعة توزع الضغط :

كما هو معلوم سابقا نبدأ من المعادلة :

$$Fx.dx + Fy.dy + Fz.dz = \frac{1}{\rho}\,dp$$

ومثلما استنتجنا سابقا لدينا :

$Fx=\omega^2 x$ و $Fy = \omega^2 y$ و $Fz = -g$

$$dp = \rho(\omega^2 x.dx + \omega^2 y.dy - gdz)$$

$$dp = \rho(\omega^2.rdr - gdz)$$

بالمكاملة نجد :

$$P = \rho\left(\omega^2 \frac{r^2}{2} - gz\right) + c \qquad (3-33)$$

لتحديد الثابت c نعود للشروط الحدية عندها يكون :

$P=P_0 \quad , \quad Z=Z_0 \quad , \quad r=r_0$

نجد: $c = P_0 - \rho\left(\frac{\omega^2 r_0^2}{2} - gZ_0\right)$

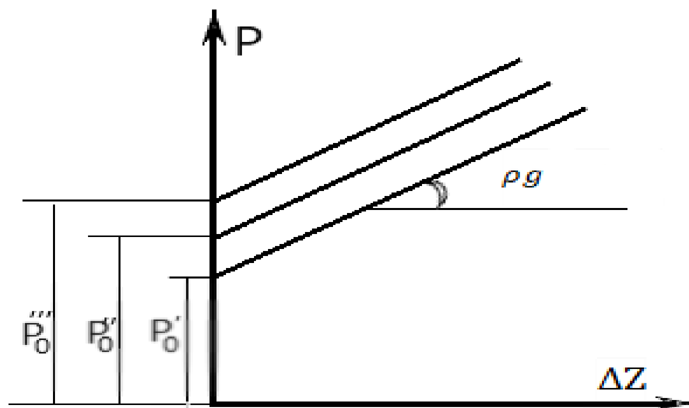
بالتعويض بقيمة c نجد :

$$P = P_0 + \rho\frac{\omega^2(r^2 - r_0^2)}{2} + \rho g(z_0 - z) \qquad (3-34)$$

يمكن ان نكتب هذه المعادلة بالشكل التالي من اجل كل شاقول يبعد عن المحور r_i

$$P = P`_0 + \rho g \Delta z \qquad (3-35)$$

وهكذا من اجل كل قيمة r_i كدليل عن مقدار البعد عن محور الدوران oz. و سيكون تغير الضغط مع العمق كما هو في الشكل (11 - 3) :

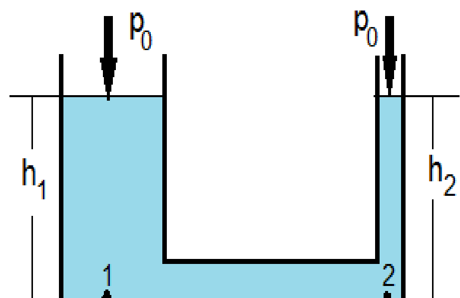


الشكل (12 - 3)

3.7-تطبيقات القانون العام في الهيدروستاتيك :

3.7.1- الاواني المتصلة :

تثبت التجربة ان ارتفاع السوائل في افرع الاواني المتصلة واحدا وذلك كما في الشكل (13 - 3) ولنفرض ان ارتفاع هذا السائل في الفرع الأول هو h_1 وفي الفرع الثاني هو h_2 فإذا اعتبرنا مستوى المقارنة هو قعر الوعاء سنجد ما يلي :



الشكل (13 - 3)

في الفرع الأول : $P_1 = P_0 + \gamma h_1$

وفي الفرع الثاني : $P_2 = P_0 + \gamma h_2$

ولكن على مستوى المقارنة الذي هو الصفر (القعر) فان الضغوط واحدة وبالتالي $P_1=P_2$ومنه :

$$\gamma h_1 = \gamma h_2 \Leftarrow P_0 + \gamma h_1 = P_0 + \gamma h_2 \qquad (3-36)$$

وكون السائل في الفرعين واحدا فان $h_1=h_2$:

لو افترضنا ان هناك سائلين مختلفين في الفرعين سنجد:

عند مستوي المقارنة $p_1=p_2$ أي ان:

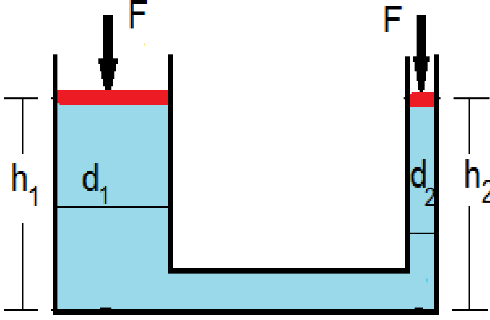
$$P_0 + \gamma_1 h_1 = P_0 + \gamma_2 h_2$$

$$\gamma_1 h_1 = \gamma_2 h_2 \Rightarrow \frac{h_1}{h_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \qquad (3-37)$$

أي ان : ارتفاع السائل في الاواني المتصلة يتناسب عكسا مع الوزن النوعي للسوائل

3.7.2- المكبس الهيدروليكي :

هو جهاز يستخدم خاصية الأواني المتصلة كما يوضح الشكل(14 - 3) مستفيدا من ظاهرة تساوي الضغوط عند السطوح المتساوية في الارتفاع ، وذلك عن طريق تغيير مساحة مقطع فروع الأواني المتصلة للاستفادة من تفاوت القوى المطبقة على مساحات

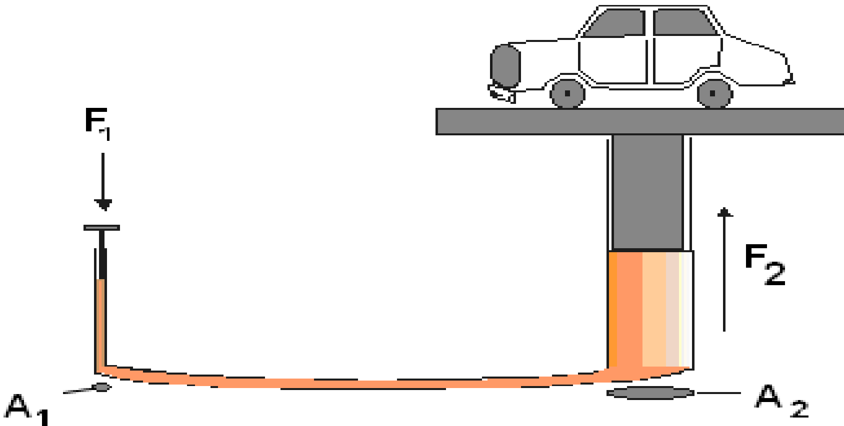


الشكل (14 - 3)

مختلفة باعتبار ان الضغط هو قسمة قوة على سطح وعندما يكون السطح كبيرا فان القوة المطبقة عليه ستكون صغيرة بالمقارنة مع القوة المطبقة على سطح صغير المساحة أي :

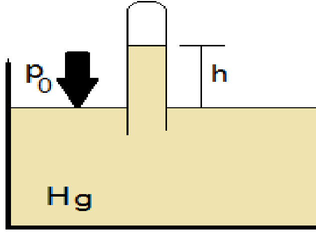
$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Rightarrow F_1 = F_2 \frac{A_1}{A_2} \qquad (3-38)$$

فكلما كان الفرق كبيرا بين مساحتي المقطعين كلما صار الفرق بين القوتين اكبر.



الشكل (15 - 3)

3.7.3- مقياس البارومتر :



الشكل (3 - 16)

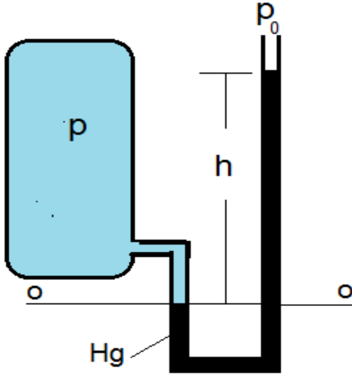
هو مقياس بسيط يقيس الضغط الجوي حيث توضع انبوبة مفرغة مقلوبة على حوض يوضع فيه الزئبق فيرتفع الزئبق في الانبوب هذا الارتفاع h يمثل قيمة الضغط الجوي في هذه المنطقة

$$P_0 = P_v + \gamma_{Hg}.h \qquad (3-39)$$

حيث :P_v هو ضغط أبخرة السائل في المقياس وعادة ما يهمل P_v لان تبخر الزئبق لا يذكر تصبح العلاقة :

$$P_0 = \gamma_{Hg}.h \qquad (3-40)$$

3.7.4-مقياس المانومتر:



الشكل (3 - 17)

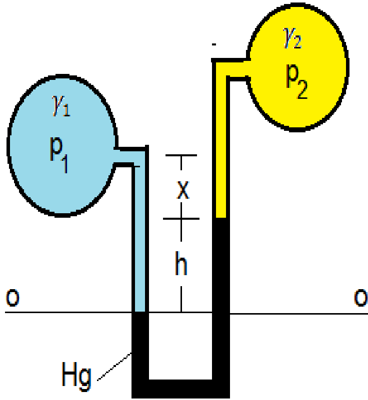
هو مقياس يقيس فرق الضغط عن الضغط الجوي فاذا كان الضغط داخل الوعاء المغلق اكبر من الضغط الجوي سوف يندفع الزئبق الموجود في المقياس ليشكل فرقا في الارتفاع مقداره h واذا كان مستوى المقارنة مستوى الفصل السفلي (0-0) سيكون :

$$P = P_0 + \gamma_{Hg}.h \qquad (3-41)$$

وعندها فان فرق الضغط :

$$P - P_0 = \gamma_{Hg}.h \qquad (3-42)$$

3.7.5- مقياس المانومتر التفاضلي الزئبقي :



الشكل (3 - 18)

هو مقياس يستخدم لقياس فرق الضغط بين وعائين كما في الشكل (3 - 18) فاذا كان $P_1>P_2$ سيرتفع سائل المقياس باتجاه الوعاء 2 وإذا أخذنا المستوى السفلي كمستوى للمقارنة :

$$P_1 + \gamma_1 x + \gamma_1.h = P_2 + \gamma_2.x + \gamma_{Hg}.h$$

فاذا كانت السوائل الموجودة في الوعاءين غازات او سوائل خفيفة جدا فيمكن اهمال القيم $\gamma_1 x$, $\gamma_1 h$, $\gamma_2 x$ نجد :

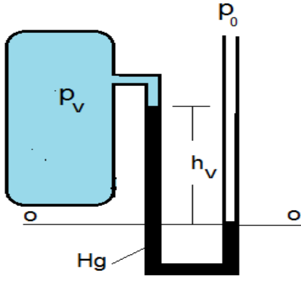
$$P_1 - P_2 = \gamma_{Hg}.\mathrm{h} \qquad (3-43)$$

3.7.6- مقياس الفاكومتر:

هو مقياس يستخدم لقياس التخلخل (اقل من الضغط الجوي) نأخذ المستوي السفلي كمستوي للمقارنة :

$$P_0 = P_v + \gamma_{Hg}.h_v$$

$$P_v = P_0 - \gamma_{Hg}.h_v \qquad (3-44)$$



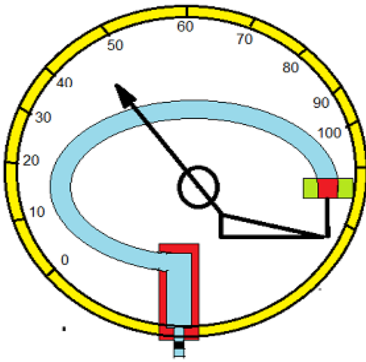
الشكل (19 - 3)

3.7.7- مقياس بوردون:

هو من اكثر الأجهزة المستعملة لقياس الضغط في الحياة العملية . ويتألف الجهاز من انبوبة اسطوانية مفرغة مقطعها على شكل قطع ناقص (اهليلجي) وشكلها العام شبه دائري حيث يغلق احد طرفيها ويترك حرا للحركة بينما يثبت الطرف الثاني تثبيتا محكما ويترك مفتوحا ليوصل بالوسط السائل المطلوب قياس ضغطه كما في الشكل (20 - 3)

3.7.7.1-مبدأ عمل المقياس:

عند زيادة الضغط داخل الانبوب الدائري عن الضغط الجوي فإن الانبوب يميل الى الاستدارة في مقطعه والاستقامة في طوله لزيادة نصف قطر تحدبه "بفعل مرونة مادة الانبوب " وتتناسب هذه التغيرات مع ضغط السائل داخله ، وبالتالي يمكن الاستفادة من التغيرات في الشكل الهندسي لنستفيد منها كدليل قياس الضغط . ويمكن ان ننقل حركة الطرف الحر من الانبوب بوساطة بعض الوصلات والمسننات الى مؤشر يدور حول قرص مدرّج بحيث تتناسب هذه التدريجيات مع الضغوط المقاسة .



الشكل (20 - 3)

ويجب الانتباه حين استعمال مثل هذه الاجهزة بعدم تعريضها لضغوط تزيد عن الضغط الاعظمي المبين على لوحة المقياس المدرجة . حيث سيتعرض الانبوب الحساس الى اجهادات تفوق مرونته فإن لم يتحطم الجهاز فانه سوف يفقد قيمته ودقته. ولابد من الإشارة الى ان مثل هذه الأجهزة يجب معايرتها (عملية تدريج مسبق)قبل استعمالها ومن الوسائل المستعملة لتدريج ومعايرة مثل هذه الأجهزة نذكر المانومترات العادية .

تنويه وتوضيح :

عندما نقيس ضغط مائع ما بجهاز قياس الضغط فإن ما نقيسه في الواقع هو الفرق بين ضغط المائع المذكور وضغط الوسط المحيط بالجهاز وعادة ما يكون الضغط المحيط هو الضغط الجوي المحلي وندعو قيمة الضغط المقاسة بالنسبة للضغط الجوي بالضغط القياسي(ضغط المقياس Gauge Pressure)فمبدأ قياس الضغط في هذه الحالة هو الضغط الجوي .أما اذا كان الفراغ التام يحيط بالجهاز فإن الضغط المقاس سيكون هو الضغط المطلق(Absolute Pressure) وبالتالي يمكن أن نكتب :

$$P_{abs} = P_g + P_{atm}$$

حين يكون الضغط المقاس أقل من الضغط الجوي ، يسمى مثل هذا الضغط بالضغط التخلخليVacuum ومن تعريف الضغطين المطلق والقياسي فان الضغط المطلق موجب دوما أما الضغط المقاس فيمكن ان يكون موجبا ويمكن ان يكون سالباً ولقد جرت العادة أن نستخدم lb_f/in^2وN/m^2 وKg_f/cm^2 أوbarأي (قوة/سطح) لقياس الضغوط فوق الضغط الجوي ونستخدم طول عمود من الزئبق أوعمود من الماء أو عمود من الكحول لقياس الضغوط تحت الضغط الجوي. ولا بد من معرفة واتقان طريقة التحويل بين واحدات القياس مع العلم أن هناك جداول خاصة يمكن أن تساعدنا في اجراء هذه التحويلات لكن هذا لا يعني أن لانعرف طرق التحويل

لأن مجال الخطأ وارد جدا في هذه الحالة ...فمثلا:

$$1bar = 1 \times 10^5 \, N/m^2$$

حيث ان N/m^2 تسمى باسكال Pa

$$1 \, N/m^2 = \frac{1}{98066.5} kgf/cm^2$$

$$1 \, kgf/m^2 = 736 \, mmHg = 10mH2o$$

$$torr = 101325Pa$$

$$kp/m^2 = 9.8066 \, N/m^2$$

وهكذا يتم التنقل بين الواحدات المستخدمة وحسب الجمل المعتمدة.

3.8-قوى دفع السوائل على السطوح الملامسة لها :

3.8.1- قوى دفع السوائل على القعر الافقي :

إن الضغط يتوزع على السطوح الافقية بشكل منتظم الشكل (21 - 3) لذلك فإن قوى الضغط أو قوى دفع السائل ستكون:

$$F = P . A \qquad (3-45)$$

الشكل (21 - 3)

حيث : A مساحة السطح و P : الضغط و F : قوة الدفع .

3.8.2- قوى دفع السائل على السطوح المائلة :

أولاً – حساب قيمة (شدّة) قوة الدفع:

ليكن المساحة A ذات الشكل الغير منتظم والمتوضعة بشكل مائل على السطح المائل..نقسم هذه المساحة الى شرائح عنصرية مساحة كل منها dA وليكن عمقها عن السطح الحر للسائل h . كما في الشكل (22 - 3) فإن القوة على هذه الشريحة :

$$dF = p.dA \qquad (3-46)$$

حيث الضغط :

$$p = \rho g h$$

أي

$$dF = \rho g h . dA$$

لكن h يمكن ان تُحسب :

$$h = y \sin \alpha$$

وبالتالي فإن قيمة القوة العنصرية ستكون :

الشكل (22 - 3)

$$dF = \rho . g . y . \sin \alpha . dA$$

لايجاد القوة نكامل العلاقة السابقة على المساحة A:

$$F = \int_A dF = \int_A \rho . g . \sin \alpha . y . dA = \rho . g . \sin \alpha \int_A y . dA \qquad (3-47)$$

ان القيمة $\int_A y.dA$ ما هي الا العزم الستاتيكي للمساحةA طول المحور ox وهي تساوي :

$$\int_A y.dA = Y_c.A \qquad (3-48)$$

حيث :

Y_C هو بعد مركز الصفيحة (c) عن المحور ox ,

hc هو عمق مركز ثقل المساحة A عن السطح الحر

ومنه :

$$F = \rho.g.\sin\alpha.Y_c.A \qquad (3-49)$$

إن القيمة $\sin\alpha.y_c$ هي h_c أي :

$$F = \rho.g.h_c.A$$

$$F = P_c.A \qquad (3-50)$$

أي ان قيمة قوة الدفع تساوي جداء الضغط المطبق عند مركز ثقل الصفيحة في المساحة .

ثانياً - تحديد مركز قوة الدفع:

لتكن النقطة D هو المركز المفترض للقوة F لتحديد مركز الدفع D نأخذ العزوم حول المحور ox إن عزم القوة F حول ox هو $F.Y_D$ و عزم القوة العنصري dF هو $dF.y$ و سيكون تكامل الجداء $dF.y$ على السطح A يجب ان يساوي $F.Y_D$ أي :

$$\int_A y.dF = F.Y_D \qquad (3-51)$$

$$Y_D = \frac{\int_A y.dF}{F} = \frac{\int_A \rho.g.y.y.\sin\alpha.dA}{\rho.g.y_c.\sin\alpha.A} \qquad (3-52)$$

$$Y_D = \frac{\int_A y^2.dA}{Y_c.A} \qquad (3-53)$$

ان القيمة $\int_A y^2.dA$ تسمى عزم عطالة المساحة *A* حول المحور *ox* ويرمز له بالرمز I_X ومنه :

$$Y_D = \frac{Ix}{Y_c.A} \qquad (3-54)$$

ان Ix يساوي عزم عطالة المساحة A حول محور يمر من مركزها مضافا إليها القيمة $Y_C^2.A$

$$I_X = I_c + {Y_c}^2.A \qquad (3-55)$$

$$\mathrm{Y_D} = \frac{\mathrm{I_C} + {\mathrm{y_c}}^2.\mathrm{A}}{\mathrm{y_c.A}} = \frac{\mathrm{I_c}}{\mathrm{y_c.A}} + \mathrm{Y_C} \qquad (3-56)$$

وبالتالي فإن $\mathrm{Y_D}$ دائماً اكبر من Y_C وذلك لان القيمة $\frac{I_C}{Y_C.A}$ موجبة دوما أي ان مركز الدفع D يقع تحت مركز ثقل المساحة C بالمقدار:

$$\mathrm{E} = \mathrm{Y_D} - \mathrm{Y_c} = \frac{\mathrm{I_c}}{\mathrm{Y_C.A}} \qquad (3-57)$$

و نبيّن في الجدول (1 – 3) عزم العطالة لبعض الأشكال الهندسية الشهيرة كالدائرة والمثلث والمستطيل و غيرها من الأشكال الشائعة :

الشكل الهندسى	عزم العطالة	نصف قطر الدوران
RECTANGLE (h, b)	$I_x = \frac{bh^3}{12}$	$\frac{h}{\sqrt{12}}$
TRIANGLE (h, b)	$I_x = \frac{bh^3}{36}$	$\frac{h}{\sqrt{18}}$
CIRCLE (r)	$\frac{\pi r^4}{4}$ OR $\frac{\pi D^4}{64}$	$\frac{r}{2}$

SEMICIRCLE	$I_x = 0.11r^4$	$k_x = 0.264r$
QUARTER CIRCLE	$I_x = I_y = 0.055r^4$	$k_x = k_y = 0.055r^4$
ELLIPSE	$I_x = \frac{\pi ab^3}{4}$ $I_y = \frac{\pi ba^3}{4}$	$k_x = \frac{b}{2}$ $k_y = \frac{a}{2}$
	$I_x = \frac{bh^3}{36}$	$\frac{h}{\sqrt{18}}$

الجدول (1 – 3) عزم العطالة لبعض الأشكال الهندسية الشهيرة

ويعطي الجدول التالي عزوم العطالة لعدد من المساحات المستوية حين دورانها حول محور يمر بمركز ثقلها و حول محاور أخرى كما يُوضح الجدول (2 -3) :

Area	I_y	I_z	I_p	$I_{\bar{y}}$
Rectangle	$\frac{h^3}{12}$	$\frac{hb^3}{12}$	$\frac{bh}{12}(h^2+b^2)$	$\frac{bh^3}{3}$
Square	$\frac{a^4}{12}$	$\frac{a^4}{12}$	$\frac{a^4}{6}$	$\frac{a^4}{3}$

Triangle	$\frac{h^3}{36}$	$\frac{b\,h}{36}(b^2 - b\,c + a^2)$	$\frac{b\,h}{36}(h^2 + b^2 - b\,a + a^2)$	$\frac{b\,h^3}{12}$
Circle	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{\pi R^4}{2}$	$\frac{5\pi}{4}R^4$
Thin Circular Ring $t \ll R_m$	$\pi R_m^3\,t$	$\pi R_m^3\,t$	$2\,\pi\,R_m^3\,t$	$3\,\pi\,R_m^3\,t$
Semi-Circle	$\frac{R^4}{72\,\pi} \times (9\,\pi^2 - 64)$	$\frac{\pi R^4}{8}$	$\frac{R^4}{36\,\pi}(9\,\pi^2 - 32)$	$\frac{\pi R^4}{8}$
Ellipse	$\frac{\pi}{4}a\,b^3$	$\frac{\pi}{4}b\,a^3$	$\frac{\pi\,a\,b}{4}(a^2 + b^2)$	$\frac{5\pi}{4}ab^3$

الجدول (2 -3) عزوم العطالة لعدد من المساحات المستوية حين دورانها حول محور يمر بمركز ثقلها و حول محاور أخرى

3.9-الطفو :

كما عرفنا سابقاً فإنّ كميّة المادة الموجودة في وحدة حجم معين من المادة هي الكثافة حيث تقاس الكثافة بوحدة Kg/m^3 ، وهي تعبّر عن مدى تراص المادة في الحيّز؛ فالمواد ذات الكثافة العالية تكون جزيئاتها متراصة ومتقاربة، بينما المواد ذات الكثافة المنخفضة تكون جزيئاتها متباعدة، وبذلك تختلف المواد في كثافتها؛ فبعضها ذات كثافة عالية كالذهب، وبعضها ذات كثافة منخفضة كالخشب. وكما وجدنا سابقاً ترتبط الكثافة بعاملين: الأول هو الكتلة، وتعرف على أنّها كميّة المادة الموجودة في الجسم، وتقاس بوحدة Kg، وتقاس بميزان ذي الكفتين، فكلما زادت كتلة المادة زادت كثافتها، والعامل الثاني هو الحجم، وهو مقدار الحيّز الذي يشغله الجسم، ويقاس بوحدة m^3 إنّ المواد تطفو على سطح السائل إذا كانت كثافتها أقل من كثافة السائل، وتغوص فيه إذا كانت كثافتها أعلى من كثافة السائل؛ فالزيت يطفو على سطح الماء؛ لأن كثافته أقل من كثافة الماء.

تُقسم الأجسام الصلبة إلى أجسام مصمتة وأجسام مجوفة، أمّا الأجسام المصمتة تطفو على الماء إذا كانت كثافتها أقل من كثافة الماء، كقطعة خشب، وتنغمر في الماء إذا كانت كثافتها أعلى من كثافة الماء، كقطعة الحديد، بينما الأجسام المجوّفة كالسفن، تُحسب كثافتها الإجمالية؛ فإن كانت أكبر من كثافة الماء فسوف تغوص فيه، أمّا إن كانت كثافتها أقل من كثافة الماء فإنّها تطفو على سطحه، والكثافة الإجمالية تُعبّر عن النسبة بين كتلتها الكلية إلى حجمها الكلي.

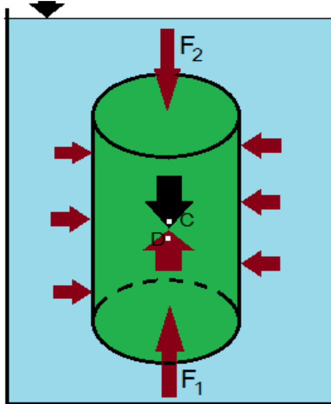
3.9.1-قوة الطفو :

إنّ العالم اليوناني أرخميدس (287- 212 ق. م) أوّل من فكّر في دراسة طفو الأجسام الصلبة أو انغمارها في السوائل، ويعود له الفضل في بناء أضخم وسائل النقل البحريّة القائمة على أساس قاعدة أرخميدس. إنّ قوة الطفو تمثّل : (وزن الجسم في السائل مطروحاً من وزن الجسم في الهواء)، والذي يساوي وزن السائل المزاح وبناءً على ذلك تنصّ قاعدة أرخميدس أنّ :" الجسم المغمور في مائع يفقد من وزنه بمقدار وزن السائل المزاح .لا شكّ أن قوة الطفو تحدّد إذا كان الجسم سينغمر أو سيطفو على سطح السائل؛ فإذا كانت قوة الطفو أقل من الوزن؛ فإن الجسم سينغمر، كقطعة الحديد مثلاً، بينما إذا كانت قوة الطفو أكبر من الوزن فإنّ الجسم سيطفو، كما هو الحال في قطعة الخشب، لكن في حال تساوي قوة الطفو مع الوزن؛ فإن الجسم يستقرّ معلقاً بين السطح والقاع كالغواصات . وكما هو معروف فإن جميع السوائل تؤثر على الأجسام المغمورة فيها بقوة دفع شاقولية قيمتها تساوي وزن السائل المزاح ، وهي في الحقيقة تعبّر عن المحصلة النهائية لقوى دفع السائل على السطح الخارجي للجسم المغمور وتنتج عن ضغط السائل على هذا السطح ،فإذا افترضنا أن جسماً صلبا متجانساً في بنيته اسطواني الشكل مغموراً في سائل كما يوضّح الشكل جانباُ ،فإن القوى الأفقية تعدم بعضها البعض أما محصلة القوى الشاقولية فهي غير معدومة وتساوي في قيمتها وزن السائل المزاح ، إذ يؤثر السائل بقوة دفع للأعلى قدرها F_1 وتساوي وزن السائل فوق سطح الأسطوانة السفلي ،بينما يؤثر على السطح العلوي للاسطوانة بقوة مقدارها F_2 محصلة هاتين القوتين هي القوة F المساوية لوزن السائل المكافىء في حجمه لحجم الأسطوانة المغمورة ، فإذا افترضنا ان حجم الجسم الاسطواني هو V و وزنه هو G وليكن الوزن النوعي للسائل هو γ_f والوزن النوعي للجسم الصلب هو γ_b سيكون لدينا :

$$F = \gamma_f . V \qquad (3-58)$$

$$G = \gamma_b . V \qquad (3-59)$$

تؤثر القوة *F* في مركز ثقل الحجم المزاح *D*



الشكل (23 - 3)

أي أن نقطة تأثير قوة الدفع F تعتمد على الشكل الهندسي للجسم المغمور ، أما وزن الجسم G فيؤثر في مركز ثقل الجسم C كما في الشكل (23 - 3) ومن البديهي معرفة أن مركز ثقل الجسم يعتمد في موضعه على توزع الكتل داخله وليس على شكله الهندسي ، وينطبق مركز الدفع D على مركز ثقل الجسم C عندما يكون الجسم متجانساً في بنيته.

3.9.2- الاجسام الغاطسة :

يسمى الجسم بالغاطس حين يحيط به السائل من كل الجهات وهنا نميز ثلاث حالات

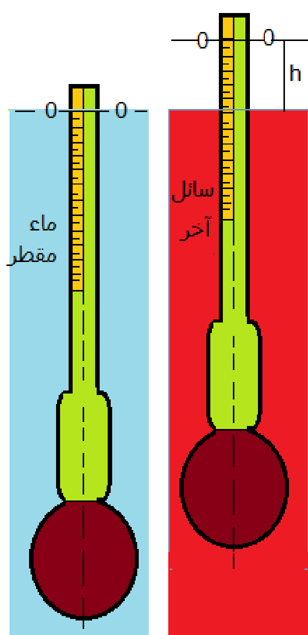
1- كثافة الجسم أكبر من كثافة السائل : وبالتالي وزن الجسم أكبر من وزن السائل المزاح وسيتحرك الجسم نحو الأسفل حتى يستقر في القاع .
2- كثافة الجسم أصغر من كثافة السائل : سيتحرك الجسم باتجاه الأعلى ويطفو جزء منه فوق السطح الحر للسائل ويتزن في وضع يُغمر منه قسم يُزيح وزناً من السائل مكافئاً لوزنه
3- كثافة الجسم تساوي كثافة السائل : وهنا يظهر الجسم وكأنه معلقاً ضمن السائل .

3.9.3- أجهزة قياس كثافة السوائل :

تعتمد أجهزة قياس الكثافة للسوائل على مبدأ توازن الاجسام الغاطسة حيث يتكون الجهاز من قاعدة كروية الشكل وساق اسطواني أو موشوري مساحة مقطعه A كما هو واضح في الشكل (24 - 3) ، ويُدرّج الساق بوضعه في الماء المقطر عند درجة حرارة قياسية معتمدة ويُحدد على المقياس الارتفاع الذي يغطس اليه الساق 0-0 ، فإذا وُضع المقياس في سائل مجهول كثافته ρ غير الماء المقطر فسوف يرتفع الساق فوق السطح الحر للسائل الجديد بمقدار h وبالتالي فإن حجم الجزء الطافي من الساق سيكون V يساوي :

$$V = A \times h$$

فإذا كان G هو وزن المقياس فسيكون :



الشكل (24 - 3)

$$h = \frac{V.(\rho - 1)}{A.\rho} \qquad (3 - 60)$$

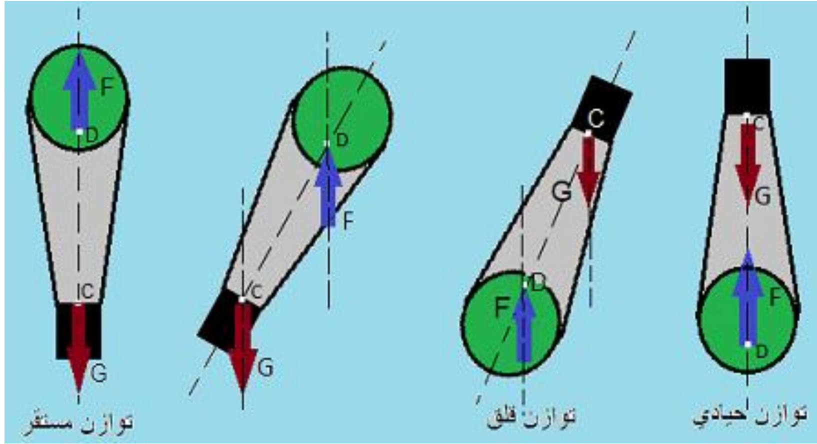
3.9.4- أنواع توازن الأجسام الغاطسة :

أي أن قراءة المسافة h بين التدريجة 0-0 والسطح الحر للسائل المجهول تعطي دليلاً عن كثافته .

تتوازن الأجسام الغاطسة بثلاث حالات :

1. **توازن مستقر** : حيث يعود الجسم إلى وضع توازنه الأساسي بعد زوال المؤثر الخارجي الذي يمكن أن يتعرّض له الجسم .
2. **توازن قلق** : حيث يزداد الانحراف حتى بعد زوال المؤثر الخارجي ويستمر في الانحراف حتى يصل الى وضع مستقر جديد .
3. **توازن حيادي** : حيث يحافظ الجسم على وضعه حين زوال المؤثر الخارجي ولا يحيد عن هذا الوضع إلا بوجود عزم دوراني جديد .

ونبين في الشكل (25 - 3) حالات التوازن المذكورة سابقاً :

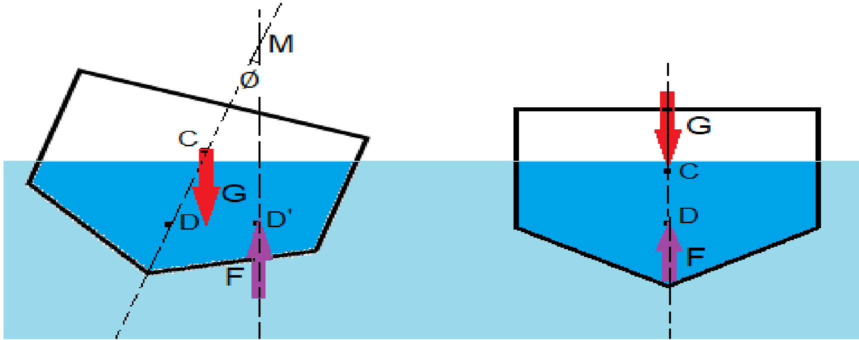


الشكل (25 - 3)

حيث يظهر أن وزن الجسم G عند مركز ثقله C أما قوة دفع السائل الشاقولية فتؤثر عند مركز الدفع D الذي هو المركز الهندسي للسائل المُزاح . ففي التوازن المستقر تعمل المزدوجة المؤلفة من FوG على إعادة الجسم إلى وضع التوازن الأصلي بينما تزيد هذه المزدوجة من انحرافه في حالة التوازن القلق أما عند انطباق مركز الثقل على مركز الدفع فإن القوتان Gو F تقعان على خط واحد ويكون التوازن حيادياً ،لذلك نقول : **لكي يكون التوازن مستقراً يجب أن يقع مركز ثقل الجسم C أسفل مركز الدفع D.**

3.9.5- توازن الاجسام الطافية :

للأجسام الطافية ايضاً ثلاث أنواع من التوازن هي المستقر والقلق والحيادي ،غير أن شرط تحقيق التوازن المستقر في الجسام الطافية يختلف عن الشرط اللازم توفره للأجسام الغاطسة ،حيث أن الأجسام الطافية يمكن أن يكون توازنها مستقراً حتى ولو كان مركز ثقلها C يقع أعلى من مركز الدفع D على أن هنالك مركزاً ثالثاً يُعرف في توازن الأجسام الطافية باسم ماوراء المركز M (Meta Centre) ويُشترط هنا لتحقيق التوازن أن يكون ماوراء المركز M دائماً أعلى من مركز ثقل الجسم C . ويبيّن الشكل (26 - 3) مقطعاً في مركب بحري في وضعيتين ، الأولى وضعية التوازن المستقر والثانية بعد انحراف المركب بزاوية Ø ، يؤثر وزن المركب G عند مركز ثقله C التي تبقى ثابتة طالما أن توزع الكُتل داخل المركب لم يتغير . أما قوة الدفع F فتؤثر عند مركز الدفع D الذي يعتمد على الشكل الهندسي للحجم المُزاح من السائل ،أي على الشكل الهندسي للقسم الغاطس من المركب، ومع تغيّر وضع توازن المركب قد يتغير الشكل الهندسي للقسم الغاطس وبذلك سيتغير موضع مركز الدفع D .



الشكل (26 - 3)

فعند انحراف المركب عن وضع توازنه انحرافاً زاويّاً قدره Ø فإن مزدوجة ستنشأ عن ذلك الانحراف مؤلفة من القوتين G تؤثر للأسفل و F تؤثر للأعلى . وتحاول هذه المزدوجة إعادة المركب إلى وضع توازنه الأصلي حيث يقع مركز الثقل C ومركز الدفع D على محور شاقوليّ واحد . يُعرّف موقع ما وراء المركز M بأنه نقطة تقاطع الخط الشاقولي الأصلي للجسم (المحور الذي يحتوي على C و D)و الخط الشاقولي الجديد (بعد الانحراف الزاويّ) الذي يمرُّ بمركز الدفع الجديد 'D .

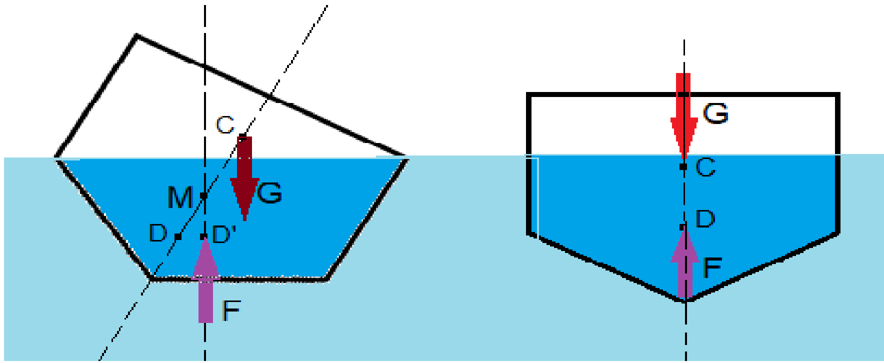
إن شرط التوازن يتطلب تحقيق المساواة :

$$F = G \qquad (3-61)$$

فإذا أثّر عزمٌ دورانيٌ على الجسم وأدى إلى انحرافه زاوية Ø فإن المزدوجة التي تحاول إعادة الجسم إلى وضع توازنه الأصلي سيكون لها العزم :

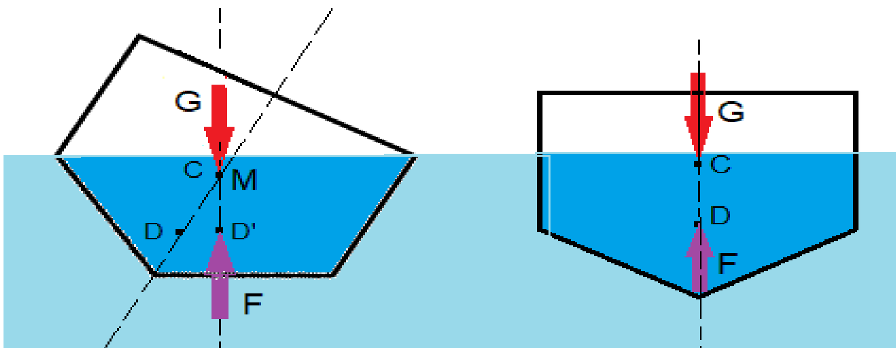
$$G.\overline{MC}.Sin\,\emptyset \qquad (3-62)$$

و يُسمى الطول $\overline{MC}$ باسم : ارتفاع ماوراء المركز ، ولكي يكون التوازن مستقراً يجب ان تقع M فوق مركز الثقل C . وكلما كانت المسافة بينهما أكبر كلما كان التوازن أكثر استقراراً ، وهذا يتحقق إما بجعل M عالية نسبياً أو بخفض مستوى مركز الثقل C للأسفل . لذلك يُراعى في السفن الضخمة أن تكون حمولاتها الثقيلة في العنابر السفلية كي نبقي على C في موقع بعيد عن ما وراء المركز M .أما حين تقع M أسفل C يكون التوازن قلقاً كما هو واضح في الشكل (27 - 3) :



الشكل (27 - 3)

بينما إذا وقعت M على C يكون التوازن حيادياً كما في الشكل (28 - 3) :



الشكل (28 – 3)

في جميع حالات التوازن الظاهرة في الأشكال السابقة توخينا أن نضع مركز ثقل الجسم فوق مركز الدفع لنبيّن عدم أهمية وضع هاتين النقطتين بالنسبة لبعضهما البعض في توازن الأجسام الطافية .

ولقد خصصنا تجربة خاصة في طريقة تحديد نقطة ما وراء المركز في الجزء العملي من هذا المقرر .

الفصل الرابع

جريان السوائل

مقدمة :

من المعلومات الضرورية التي يجب معرفتها عند جريان سائل معين، سواء في الدراسة النظرية أو في الدراسة التجريبية، هي ما ندعوه خواص الجريان والتي تتضمن:

1 - متجه السرعة   2 – ضغط السائل   3 – الكثافة   4 – درجة الحرارة

إن معرفة هذه الخواص في لحظة زمنية وفي مختلف نقاط الجريان أمر ضروري لحساب المقادير التي نهتم بها عادة كقوى الدفع وقوى الاحتكاك بين طبقات المائع أو بين المائع المتحرك والجدران الصلبة الملامسة له أو لمعرفة الاستطاعة اللازمة لنقل السوائل أو معرفة ضياعات الاحتكاك أو غيرها من المقادير ...

بالعودة إلى خواص الجريان الأربعة السابقة نجد أن ثلاث منها ذات قيمة سلميّة هي الضغط والكثافة ودرجة الحرارة بينما السرعة هي قيمة شعاعية أي أن تحديدها يتطلب معرفة قيمتها واتجاهها وعليه فإنه في الحركة الفراغية سيكون لدينا ست مجاهيل، ثلاث منها هي مساقط السرعة والقيم السلمية الباقية: الضغط والكثافة ودرجة الحرارة وبالتالي يلزمنا ست معادلات رياضية لنستطيع حل المعضلة ومعرفة المجاهيل الستة السابقة.

هذه المعادلات هي:

1 – معادلة الاستمرار: وهي الصيغة الرياضية لمبدأ حفظ المادة.

2 – معادلة الحركة: وهي الصيغة الرياضية لقانون نيوتن الثاني في الميكانيك.

3 – معادلة القدرة: وهي الصيغة الرياضية للمبدأ الأول في الديناميك الحراري.

4 – معادلة الحالة: وهي الصيغة الرياضية لقانون الغازات الكاملة.

في هذه المعادلات السابقة نميز أن معادلة الحركة فقط هي معادلة اتجاهية (شعاعية) وحيدة أي تربط بين مقادير شعاعية وبالتالي سيكون لمعادلة الحركة مساقط ثلاث متوافقة مع جملة المحاور الاحداثية المرجعية وبالتالي يمكن اعتبار أن لمعادلة الحركة هذه ثلاث معادلات فرعية وفق المحاور الاحداثية ولدينا المعادلات السلمية الثلاث الباقية وبالتالي حصلنا على ست معادلات رياضية ستكون كافية لايجاد خواص الجريان "ثلاث للسرعة والضغط والكثافة ودرجة الغليان" وتعينها عند مختلف نقاط الجريان

في اللحظة الزمنية المقصودة أي سيكون لدينا اربع متحولات مستقلة هي (t, z, y, x) وستتبع خواص الجريان لهذه المتحولات ..

$v = v(x, y, z, t)$ أي السرعة تابعة للزمان t وللمكان x, y, z

$p = p(x, y, z, t)$ أي الضغط تابع للزمان t وللمكان x, y, z

$\rho = \rho(x, y, z, t)$ أي الكثافة تابعة للزمان t وللمكان x, y, z

$T = T(x, y, z, t)$ أي درجة الحرارة تابعة للزمان t وللمكان x, y, z

وسيكون المشتق الكلّي لأيّ من التوابع السابقة كما يلي:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x}\, dx + \frac{\partial p}{\partial y}\, dy + \frac{\partial p}{\partial z}\, dz + \frac{\partial p}{\partial t}\, dt \qquad (4-1)$$

وكذلك الأمر بالنسبة للكثافة ولدرجة الحرارة ، أما شعاع السرعة فيكتب بدلالة مساقطه على المحاور :

$$\mathrm{v = ui + vj + wk} \qquad (4-2)$$

حيث : k , j , i هي متجهات (أشعة) الوحدة الأساسية على المحاور z , y , x على التوالي.

إن شعاع السرعة v يتبع المتحولات المستقلة الأربعة t, z, y, x فسوف تتبع مساقطه الثلاثة w , v , u لتلك المتحولات أي:

$$\begin{aligned}
\mathrm{du} &= \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}}\, \mathrm{dx} + \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}}\, \mathrm{dy} + \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}}\, \mathrm{dz} + \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}}\, \mathrm{dt} \\
\mathrm{dv} &= \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}}\, \mathrm{dx} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}}\, \mathrm{dy} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}}\, \mathrm{dz} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{t}}\, \mathrm{dt} \qquad (4-3) \\
\mathrm{dw} &= \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}}\, \mathrm{dx} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}}\, \mathrm{dy} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}}\, \mathrm{dz} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{t}}\, \mathrm{dt}
\end{aligned}$$

وهكذا توصلنا إلى المعادلات التفاضلية الستة التي تساعدنا بسهولة بإيجاد خواص الجريان الستة.

4.1 - الجريان الدائم والجريان غير الدائم:

اذا كانت خواص الجريان ثابتة مع الزمن عند موقع معين دعي هذا الجريان بالدائم أما اذا كانت هذه الخواص تتغير مع مرور الزمن نطلق على الجريان باسم الجريان غير الدائم . وعليه فإنه في الجريان الدائم $\frac{d}{dt}$ سوف تساوي الصفر علما أنه للقيم $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dx}}$ و $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}$ و

$\frac{d}{dz}$ لها قيم أما في الجريان غير الدائم فإن $\frac{d}{dt}$ لاتساوي الصفر ، وبالتالي في الجريان الدائم تصبح عدد المتغيرات ثلاثة (الاحداثيات) بدلا من أربعة حيث نلغي عامل الزمن.

4.2-الجريان المنتظم والجريان غير المنتظم:

الجريان المنتظم: هو الجريان الذي لا تتغير فيه خواص الجريان (السرعة والضغط والكثافة ودرجة الحرارة) حين الانتقال وفق اتجاه ما مع المحافظة على الزمن ثابتا..

الجريان غير المنتظم: بعكس الجريان المنتظم تتغير فيه خواص التيار عند الانتقال وفق اتجاه ما.

ولابد من الإشارة الى ان انتظام الجريان يمكن ان يكون باتجاه محور واحد من المحاور الاحداثية وليكن مثلا ox او باتجاه محورينox , oy , ويمكن أن يكون باتجاه المحاور الثلاث أيضا.

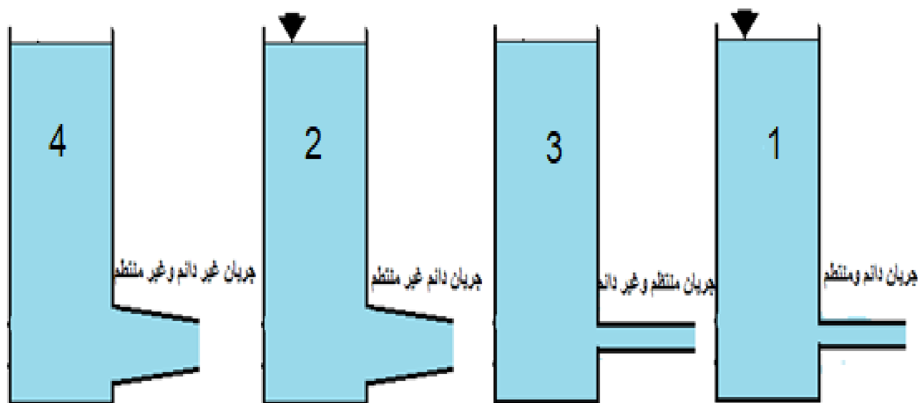
1 – جريان سائل في أنبوب طويل ثابت المقطع وبتدفق ثابت يعتبر دائم و منتظم وفق اتجاه محور الانبوب .

2 - جريان سائل في أنبوب طويل متغير المقطع وبتدفق ثابت يعتبر دائم وغير منتظم.

3 – جريان سائل في أنبوب طويل ثابت المقطع وبتدفق متغير يعتبر غير دائم ولكن منتظم.

4 – جريان سائل في أنبوب طويل متغير المقطع وبتدفق متغير يعتبر غير دائم وغير منتظم.

كما يبيّن الشكل (1- 4) :



الشكل (1- 4) التمييز بين أنواع الجريان بالملاحظة العملية

4.3-الجريان وحيد البعد وثنائي البعد وثلاثي البعد:

اذا تغيرت خواص الجريان (السرعة والضغط والكثافة ودرجة الحرارة) مع الاحداثيات الثلاثة دعي الجريان بالجريان الثلاثي الابعاد وهنا تكون خواص الجريان تابعة للاحداثيات الثلاث z , y , x أما اذا كانت خواص الجريان تتغير في اتجاهين فقط دعي الجريان بثنائي البعد وكذلك الامر اذا كانت خواص الجريان تتغير وفق اتجاه واحد سمي الجريان بوحيد البعد.

وبالتالي فإنه في الجريان الثلاثي البعد وغير الدائم تكون خواص الجريان تابعة للمتحولات الأربعة المستقلة t, z, y, x أي :

$$\begin{aligned} v &= v(x, y, z, t) \\ p &= p(x, y, z, t) \\ \rho &= \rho(x, y, z, t) \\ T &= T(x, y, z, t) \end{aligned} \qquad (4-4)$$

أما في الجريان الوحيد البعد والدائم مثلا فإن العلاقات السابقة تصبح :

$v = v(x) \quad , \quad p = p(x) \quad , \quad \rho = \rho(x) \quad , \quad T = t(x)$

فمثلا: جريان سائل في أنبوب طويل ثابت المقطع وبمعدل تدفق ثابت هو جريان وحيد البعد ودائم أما حركة الهواء حول جناح طائرة مثلا هو نموذج للجريان ثنائي البعد(المستوي) حيث يكون لشعاع السرعة مسقطين فقط.

4.4-الجريان القابل للانضغاط والجريان غير القابل للانضغاط:

اذا كانت كثافة المائع ثابتة مع الزمن والمكان (أي غير تابعة للمتحولات المستقلة الأربعة) سمي المائع غير قابل للانضغاط والعكس صحيح عندما تتغير الكثافة مع المتحولات السابقة يعتبر السائل قابل للانضغاط وبشكل عام فإننا نعتبر السوائل، موائع غير قابلة للانضغاط بينما الغازات هي موائع قابلة للانضغاط .

4.5-تعاريف هامة:

1 – المسار: هو الخط الذي يسير عليه جزئي المائع من مكان الى اخر ..

2 – خط التيار: هو المماس لأشعة سرعة جزئي المائع في لحظات زمنية متتابعة.

3 – أنبوب التيار: هي حزمة من خطوط التيار تشكل مع بعضها انبوبة حدودها الخارجية تشكل إطار كالجسم الصلب

4 – المقطع الحي: هو المقطع الذي يشكله تقاطع سطح ناظمي على انبوبة التيار ويكون هذا المقطع مستويا في الجريان الدائم ويكون محدبا في الجريان غير الدائم $\frac{dv}{dt} \neq 0$

5 – التدفق الحجمي: هو حجم السائل المتدفق خلال واحدة الزمن أي حجم/زمن مثلا m^3/s

6 – التدفق الكتلي: هو كتلة السائل المتدفق خلال واحدة الزمن أي كتلة/زمن مثلا $^{kg}/_{s}$

اذا كان المقطع الحي dA وكانت السرعة التي يمر بها السائل من خلاله u فإن التدفق (الغزارة) هي:

$$dQ = u.dA \qquad (4-3)$$

وسيكون التدفق الكلي من خلال السطح A هو:

$$Q = \int_A u \,.\, dA \qquad (4-4)$$

7 – السرعة الآنية: وتسمى السرعة اللحظية أيضا وهي سرعة جزيء ما من سائل في لحظة زمنية بعينها.

8 – السرعة الوسطى: هي ناتج قسمة القيمة $\int_A u \,.\, dA$ على مساحة المقطع الكلية A أي:

$$W = \frac{\int_A u \,.\, dA}{A} \qquad (4-5)$$

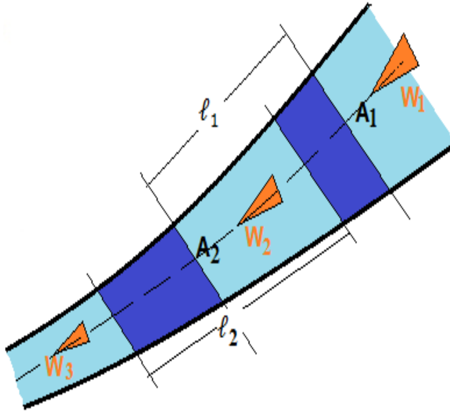
9 – السائل المثالي: هو سائل تنعدم فيه قوى الاحتكاك اثناء الجريان.

10 – السائل الحقيقي: هو سائل يكون فيه لقوى الاحتكاك قيمة اثناء الجريان.

4.6-معادلة الاستمرار:

ليكن لدينا انبوبة تيار كما هو موضح في الشكل الجانبي ولنحصر وهمياً كتلة من السائل المتحرك ضمن هذه الانبوبة بين مقطعين A_1 وA_2 المسافة بينهما ℓ_1 ان هذه الكتلة

من السائل سوف تنتقل بعد فترة زمنية dt مسافة معينة ولنحاول ان نحصرها بين مقطعين جديدين المسافة بينهما لتكن ℓ_2 سنجد: أن حجم السائل في القسم ℓ_1 يساوي حجم السائل في القسم ℓ_2 هذا يعني ان كمية السائل الخارج من المقطع A_2 يجب أن تساوي كمية السائل الداخلة للمقطع A_1 خلال نفس الفترة الزمنية dt .أي ان :



الشكل (2- 4)

$$A_1.W_1.dt = A_2.W_2.dt$$

$$A_1.W_1 = A_2.W_2 \qquad (4-6)$$

ولو تابعنا حركة هذه الكتلة المقطع ثالث سيكون:

$$A_2.W_2 = A_3.W_3$$

$$A_1.W_1 = A_2.W_2 = A_3.W_3 = Const \qquad (4-7)$$

نستنتج: ان جداء سرعة السائل بمساحة المقطع الحي هي قيمة ثابتة ..

أما اذا كان السائل قابلاً للانضغاط فإننا ندخل الكثافة لتصبح المعادلة : **m** = ρ.Q

لتصبح المعادلة:

$$\rho_1.A_1.W_1 = \rho_2.A_2.W_2 = \rho_3.A_3.W_3 = Const \qquad (4-8)$$

4.7-معادلة الحركة لإيلر *Euler* للسوائل المثالية:

لنأخذ أسطوانة عنصرية من سائل مثالي مقطعها dA ولنفترض أن هذا المقطع ثابتا على طول الاسطوانةdL

ان القوى المؤثرة على هذه الأسطوانة هي:

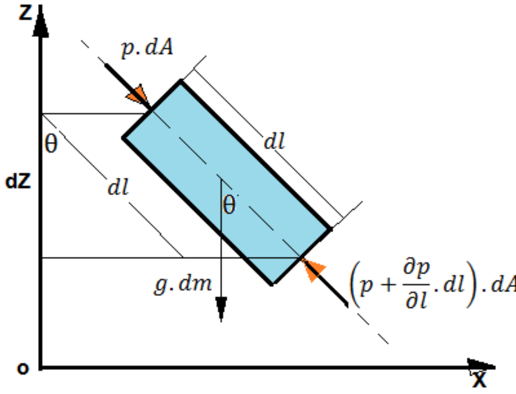
1 – قوى الضغط ولتكنF_P:

$$F_P = p.dA - \left(p + \frac{\partial p}{\partial l}.dl\right).dA = -\frac{\partial p}{\partial l}.dl.dA \qquad (4-9)$$

2 – قوى الضغط على الجوانب
وهذه القوى تعدم بعضها البعض وسيكون محصلتها الصفر.
3 – قوة الثقالة: وتؤثر في مركز ثقل هذه الأسطوانة و قيمتها:

$$Fg = -g.dm.\cos\theta$$
$$= -g.\rho.dl.dA.\cos\theta$$

ان مجموع هذه القوى يساوي الى قوة العطالة أي الكتلة × التسارع:



الشكل (3- 4)

$$Fs = dm.\frac{dv}{dt}$$

وبالنتيجة نجد: $Fs = Fp + Fg$

$$Fs = -\frac{\partial p}{\partial l}.dl.dA - g.\rho.dl.dA.\cos\theta = \rho.dl.dA\frac{dv}{dt} \qquad (4-10)$$

ومنه:

$$-g.\rho.\cos\theta - \frac{\partial p}{\partial l} = \rho.\frac{dv}{dt} \qquad (4-11)$$

ان القيمة $\cos\theta$ ما هي الا النسبة $\frac{\partial z}{\partial t}$ وبالتعويض نجد

$$-g.\rho\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial l} = \rho\frac{dv}{dt} \rightarrow \frac{dv}{dt} = -g\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial l} \qquad ....(1)$$

من جهة أخرى يمكن ان نحسب $\frac{dv}{dt}$ بطريقة رياضية ثانية حيث أن السرعة تابعة للزمن وللمكان أي :

$$v = f(l,t) \Rightarrow dv = \frac{\partial v}{\partial l}.dl + \frac{\partial v}{\partial t}.dt$$

بالقسمة على dt نجد:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial l}.\frac{dl}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

ولكن $\frac{dl}{dt}$ هي السرعة v وبالتالي:

$$\frac{dv}{dt} = v.\frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

وبادخالv ضمن التفاضل تصبح العلاقة

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{2}.\frac{\partial v^2}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{................(2)}$$

بالمساواة بين العلاقتين 1 و 2 نجد:

$$\frac{1}{2}.\frac{\partial v^2}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t} = -g\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial l} \qquad (4-12)$$

وبافتراض أن الجريان دائما أي $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ وبما ان التفاضل صار فقط بالنسبة ل∂l صار بإمكاننا تحويل التفاضل الجزئي الى تفاضل كلي لتصبح العلاقة:

$$\frac{1}{2}.\frac{dv^2}{dl} + g\frac{dz}{dt} + \frac{1}{\rho}\frac{dp}{dl} = 0 \qquad (4-13)$$

هذه المعادلة يطلق عليها معادلة أيلر في الجريان الوحيد البعد لسائل مثالي لجريان دائم وغير قابل للانضغاط..

ملاحظةهامة : في الحالة العامة عندما تكون الأسطوانة المقتطعة متغيرة المقطع فسوف تدخل قوى أخرى على السطوح الجانبية حيث أن القوى هذه لن تعدم بعضها البعض وهي:

$$\left(\mathbf{p} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\frac{\mathbf{dp}}{\mathbf{dl}}.\mathbf{dl}\right)\left(\mathbf{dA} + \frac{\mathbf{d(dA)}}{\mathbf{dl}}.\mathbf{dl}\right)$$

وكذلك فان الضغط على السطح الثاني للاسطوانة يتغير مع تغير المقطع لتصبح:

$$\left(\mathbf{p} + \frac{\mathbf{dp}}{\mathbf{dl}}.\mathbf{dl}\right)\left(\mathbf{dA} + \frac{\mathbf{d(dA)}}{\mathbf{dl}}.\mathbf{dl}\right)$$

إضافة طبعا الى قوة الضغط على السطح الأول وقوة الثقالة ومجموع هذه القوى يساوي قوة العطالة ...ويمكن التأكد اننا سنصل الى معادلة أيلر نفسها ...

يمكن كتابة معادلة أيلر بشكل آخر وذلك بضرب طرفي المعادلة بdl

$$\frac{dv^2}{2} + \frac{dp}{\rho} + g.d.z = 0 \qquad (4-14)$$

4.8- معادلة بيرنولي للضغط والقدرة:

بمكاملة معادلة أيلر (4 – 14)نجد:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g.z = const \qquad (4-15)$$

بالقسمة على g نجد:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = c \qquad (4-16)$$

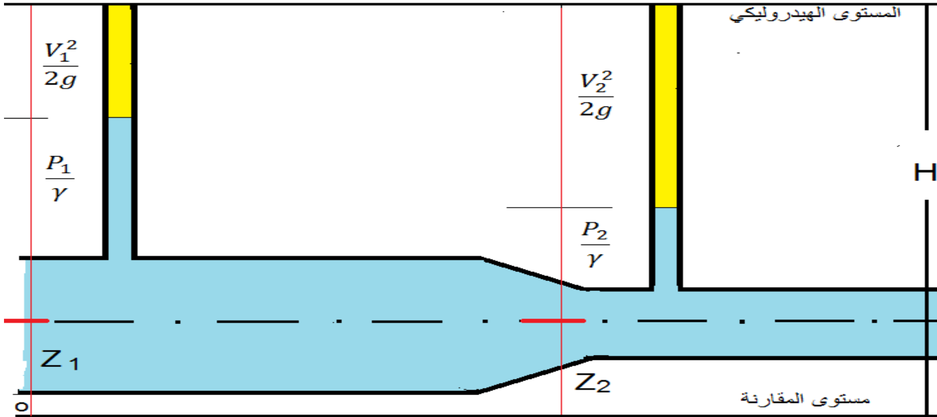
هذه المعادلة هي معادلة بيرنولي وتسمى أيضا تكامل بيرنولي ...

إن الحدود السابقة لمعادلة برنولي تعبّر فيزيائياً عن الحدود التالية:

- $\frac{v^2}{2g}$ يعبّر عن رأس السرعة أو حمولة السرعة
- $\frac{p}{\gamma}$ يعبّر عن رأس الضغط أو حمولة الضغط.
- Z يعبّر عن رأس الارتفاع أو حمولة الارتفاع.

مجموع هذه الحمولات ثابت دائماً ويساوي الحمولة الكلية .إن هذه الحمولة الكلية ثابتة في أي مقطع من مقاطع الجريان لذلك يمكن أن نكتب:

$$\frac{{v_1}^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{{v_2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = H = const \qquad (4-17)$$

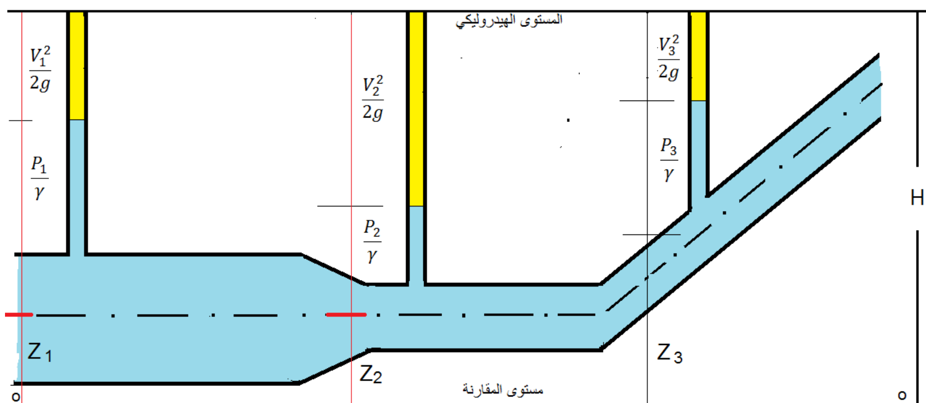


الشكل (4 -4) حدود معادلة بيرنوللي

وتبقى الحمولة الكليّة ثابتة حتى لو تغير مقطع الجريان أو لو تغير الاتفاع عن مستوي المقارنة ، وكما توضّح الأشكال المرفقة فإن إحدى الحمولات يمكن أن تتغير ولكن

يرافقها تلقائياً تغيرٌ في الحمولات الأخرى بحيث تبقى الحمولة الكلية H ثابتة ، أي :

$$\frac{v_1^{\ 2}}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^{\ 2}}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = \frac{v_3^{\ 2}}{2g} + \frac{p_3}{\gamma} + z_3 = H = const$$



الشكل (5- 4) حدود معادلة بيرنوللي بيانياً مع تغير المقطع والارتفاع

4.9-جريان الموائع الحقيقية وحيدة البعد:

على الرغم من أنه يمكن اعتبار ان الموائع الحقيقية غير قابلة للانضغاط إلا أنها ليست عديمة الاحتكاك أو اللزوجة ولهذا يؤثر الاحتكاك الداخلي على تحويل جزء من طاقة الجريان إلى شكل آخر للطاقة كالحرارة أو الصوت وقوى الاحتكاك هذه تعيق الجريان.

4.9.1-الجريان الصفحي والجريان المضطرب :

الجريان الصفحي : يحدث عندما تكون السرعة ومساحة مقطع الجريان صغيران نسبياً وتتوضع طبقات السائل فوق بعضها على شكل صفائح.

الجريان المضطرب : تختلط الطبقات السائلة ويكون الجريان غير دائم وفيه دوامات عشوائية.

استطاع العالم (Reynolds) أن يدرس هذه الحالة واستطاع أن يحدد أنه عند سرعة محددة من أجل نوع ما من السائل فإن الاختلاط يتم ويحدث الاضطراب وأجرى بحوثه مع أقطار مختلفة ولسوائل مختلفة فوجد استناداً إلى التحليل البعدي والتجريبي أن هناك رقماً هاماً لا بعدياً قيمته يمكن أن تحدد الجريان الصفحي إذا كان

تحت 2300 والجريان انتقالي إذا كان تحت 10,000 وفوق الـ 10,000 يكون الجريان مضطرب ويكون مخطط توزع السرعة كما في الشكل :



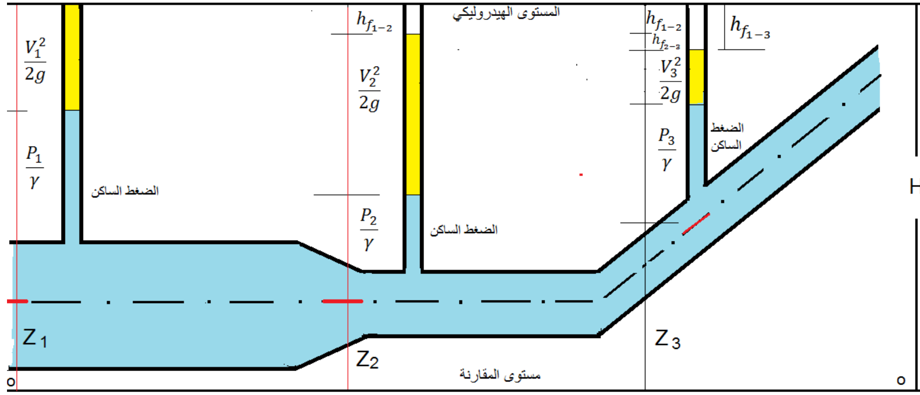
الشكل (6- 4) الجريان الصفحي والجريان المضطرب

4.9.2-معادلة القدرة لجريان المائع الحقيقي:

يجب إضافة معامل تصحيح الى حد القدرة الحركية هذا المعامل احصائيا وجد انه يساوي $\alpha = \frac{1}{2}$ في الجريان الصفحي و$\alpha = 1$ في الجريان المضطرب ،كما أنّ مجموع الحدود الثلاثة لن يكون ثابتا على طول الجريان للتيار وانما ينقص باستمرار وهذا النقص يدعى نقص القدرة نتيجة الاحتكاك ويسمى حمولة الاحتكاك $h\alpha$ او ضياع الحمولة وعليه تصبح معادلة بيرنولي:

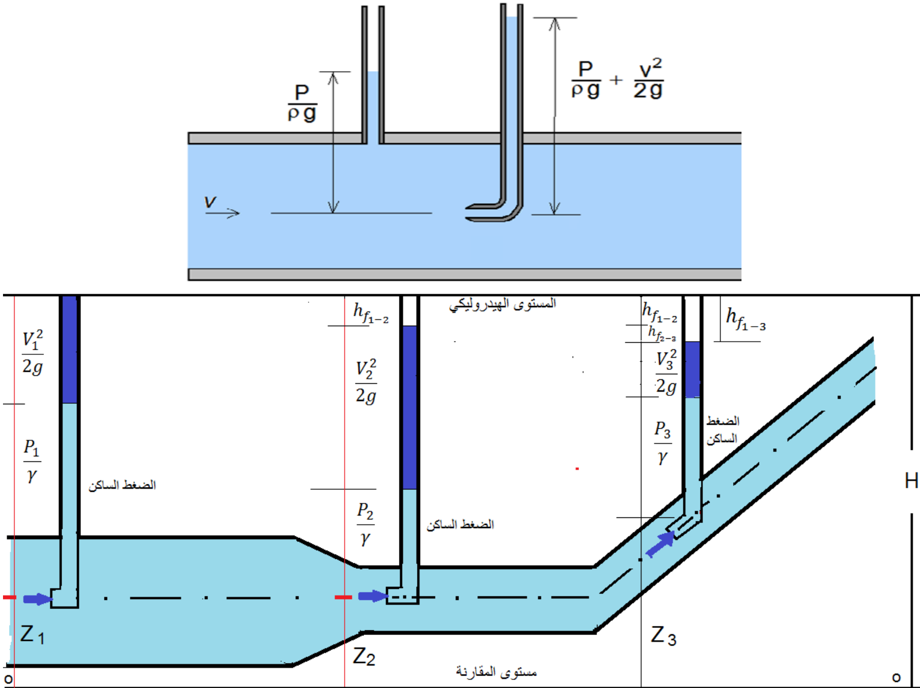
$$\frac{V_1^2}{2g\alpha_1} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g\alpha_2} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h_{f_{1-2}} \qquad (4-18)$$

ويمكن تمثيل هذه المعادلة بيانياً كما قمنا بالتمثيل البياني لمعادلة بيرنوللي في حالة جريان السائل المثالي ، ويبين الشكل التالي التمثيل البياني لمعادلة القدرة لبيرنوللي في حالة جريان السوائل الحقيقية موضحاً حالات التغير بالحمولة الحركية و الحمولة الهندسية مع التأكيد أن السائل سيرتفع في الانابيب الشاقولية مُظهراً الضغط الستاتيكي (الساكن) ويبقى بقية الانبوب الشعري فارغاً كما يبين اللون الاصفر الذي يعبّر عن الحمولة الحركية وباللون الأبيض عن الضياع بالطاقة نتيجة الاحتكاك (حمولة الاحتكاك) :



الشكل (7 -4) حدود معادلة بيرنوللي للسائل الحقيقي

ويمكن توضيح الضغط الديناميكي (الحمولة الحركية) الذي ينتج من تحول القدرة الحركية الى قدرة ضغطية وذلك باستخدام نفس الجهاز السابق ولكن بتمديد الانابيب الى مركز انبوبة الجريان و عقف نهاياتها بحيث تقابل الجريان في محور الأنبوب ، حيث يصطدم السائل بالفتحة وبالتالي تنخفض السرعة في هذه النقطة إلى الصفر (نقطة التوقف) وبالحال تتحول الطاقة الحركية إلى طاقة ضغطية (الضغط الديناميكي) وبالتالي سيظهر ارتفاع للسائل في الأنابيب الشعرية كما يُبيّن الشكل في الأسفل :



الشكل (8 -4) حدود معادلة بيرنولي لسائل حقيقي بإظهار الضغط الديناميكي

ان الضياع في الحمولة بين الحدود الثلاثة يسمى الضياع الهيدروليكي وهنا لابد من التنويه إلى بعض التعابير الهامة :

الميل البارومتري : هو النسبة بين :

$$i_B = \frac{\left(\frac{p1}{\gamma 1} + z1\right) - \left(\frac{p2}{\gamma 2} + z2\right)}{l} \qquad (4-19)$$

حيث l طول الانبوب بين المقطعين 1 و2

الميل الهيدروليكي : هو فاقد الحمولة العضلية على طول الانبوب أي :

$$\mathrm{i} = \frac{\mathrm{h}_{\mathrm{f}_{1-2}}}{\mathrm{l}} = \frac{\mathrm{H1} - \mathrm{H2}}{\mathrm{l}} \qquad (4-20)$$

$$i = \frac{\left(\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{\alpha_1 . 2g}\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{\alpha_2 . 2g}\right)}{l} \qquad (4-21)$$

4.9.3-معادلة القدرة لبيرنوللي في الجريان غير الدائم:

كما بات معلوما أن الجريان غير الدائم يعني أن هناك تغير للسرعة مع الزمن أي:
$\frac{\mathrm{dv}}{\mathrm{dt}} \neq 0$ وبالتالي ستصبح معادلة القدرة في الجريان غير الدائم على الشكل:

ا – للسائل المثالي:

$$\frac{\mathrm{V}_1^2}{2\mathrm{g}} + \frac{\mathrm{P}_1}{\gamma} + \mathrm{Z}_1 = \frac{\mathrm{V}_2^2}{2\mathrm{g}} + \frac{\mathrm{P}_2}{\gamma} + \mathrm{Z}_2 + \frac{1}{\mathrm{g}}\int_{\mathrm{l}_1}^{\mathrm{l}_2} \frac{\mathrm{dV}}{\mathrm{dt}}\mathrm{dl} \qquad (4-22)$$

ب – للسائل الحقيقي:

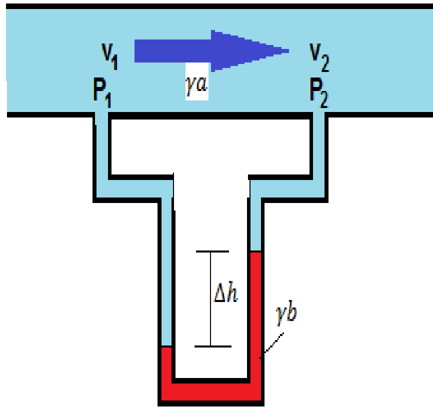
$$\frac{V_1^2}{2\mathrm{g}\alpha} + \frac{\mathrm{P}_1}{\gamma} + \mathrm{Z}_1 = \frac{\mathrm{V}_2^2}{2\mathrm{g}\alpha} + \frac{\mathrm{P}_2}{\gamma} + \mathrm{Z}_2 + \frac{1}{\mathrm{g}}\int_{\mathrm{l}_1}^{\mathrm{l}_2} \frac{\mathrm{dV}}{\mathrm{dt}}\mathrm{dl} \quad + h_{f_{1-2}} \quad (4-23)$$

4.9.4- بعض التطبيقات على معادلة بيرنوللي:

لنتعرف أولا على كيفية استخدام مقياس الضغط التفاضلي والذي يُسمّى أنبوبة U لقياس فرق الضغط بين نقطتين عند الجريان في أنبوب ما، حيث يُوصل الانبوب U

بمكانين مختلفين على طول الانبوب كما يوضح الشكل (6- 4) ونتيجة انخفاض

السرعة بسبب الاحتكاك في الانبوب فان الضغط سوف يرتفع في المكان الثاني وسيظهر الزئبق أو سائل المقياس كما هو موضح في الشكل، وبأخذ الضغوط على سطح الفصل الأخفض نجد:



الشكل (9- 4)

$$P_1 + \gamma_a . h_a + \gamma_a . \Delta h = P_2 + \gamma_a . h_a + \gamma_b . \Delta h$$

وبالاصلاح نجد:

$$P_2 - P_1 = \Delta h(\gamma_b - \gamma_a) \qquad (4 - 24)$$

4.9.4.1-الجريان الثقلي للسوائل عبر فتحة من خزان :

سوف ندرس ثلاث حالات للجريان الثقلي عبر فتحة من خزان وهي:

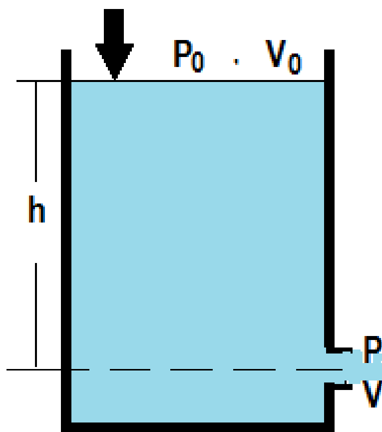
ا – مستوى السائل في الخزان ثابتا والفتحة صغيرة .

ب - مستوى السائل في الخزان ثابتا والفتحة كبيرة .

ج - مستوى السائل في الخزان ينخفض .

الحالة الأولى :

في هذه الحالة يمكن أن نعتبر أن الجريان دائما ولنفترض أن السائل عند خروجه من الفتحة سيلامس جدرانها تماما(نظريا) ولتكن السرعة للسائل على السطح الحرفي للخزان هي V_0 والضغط P_0 وليكن السرعة للسائل الخارج من الفتحة v والضغط p كما في الشكل (10- 4) لنطبق معادلة بيرنوللي على خط التيار الذي يمر من الفوهة وسطح الخزان:



الشكل (10- 4)

$$\frac{v_0^2}{2g}+\frac{p_0}{\gamma}+h=\frac{v^2}{2g}+\frac{p}{\gamma}+0$$

ولكن كما هو واضح أن الضغط P هو الضغط الجوي وكذلك الأمر p_0 أي $p=p_0$ وكذلك افترضنا أن السائل لا ينخفض في الخزان أي ان $V_0=0$

وبتطبيق هذه المعطيات نجد:

$$h=\frac{v^2}{2g}\rightarrow v^2=2g.h\rightarrow v=\sqrt{2g.h} \qquad (4-25)$$

هذه المعادلة يطلق عليها اسم معادلة تورشيللي لحساب السرعة وهذه السرعة هي السرعة النظرية ، حيث ان السرعة الفعلية لخروج السائل من الفوهة ستكون أقل وذلك بسبب الضياعات في القدرة الحركية ولذلك يُدخل معامل تصحيح وليكن α لتصبح السرعة الفعلية:

$$w=\alpha\sqrt{2g.h} \qquad (4-26)$$

ولكي نحسب التدفق النظري نستخدم السرعة النظرية :

$$Q_{th}=A.V=A\sqrt{2g.h} \qquad (4-27)$$

وكذلك الامر فإن التدفق الفعلي أقل من النظري لوجود ظاهرة التضيق او الاختناق عند خروج السائل من الفوهة وسيكون هناك مقطع حي لخروج السائل يختلف عن المقطع الأصلي للفتحة وتكون النسبة بينهما هي$\frac{Ac}{A}=\varepsilon$ وتسمى معامل الرَّص . لذلك سيكون التدفق الفعلي كما يلي:

$$Q=Ac.w=A.\varepsilon.\alpha\sqrt{2g.h} \qquad (4-28)$$

ان الجداء $(\varepsilon.\alpha)$ يسمى φ ويُطلق عليه اسم معامل الجريان وبالتالي سيكون التدفق

$$Q=\varphi.A\sqrt{2g.h} \qquad (4-29)$$

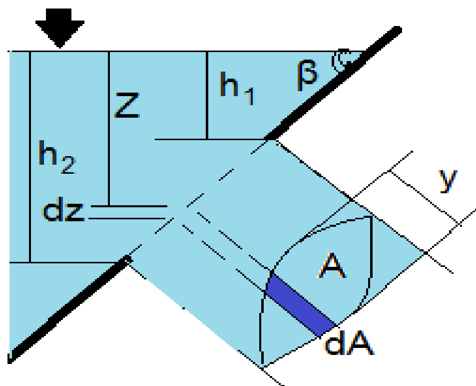
ان قيمة معامل الجريان φ بالنسبة للماء تتراوح بين (0.61 -0.63)

لابد من الملاحظة انه لو لم نحذف السرعة للسطح الحر في للخزان ولم نحذف الضغطين مع بعضهما فان معادلة السرعة ستكون على الشكل التالي :

$$V=\sqrt{V_0^2+2g\left(\frac{P_0-P}{\gamma}\right)+2g.h} \qquad (4-30)$$

هذه المعادلة مهمة في حالة أن الخزان مغلق وتحت الضغط علمأ انه يمكننا أن نهمل السرعة .

الحالة الثانية - عندما تكون الفتحة كبيرة : ولنفترض أن الجدار مائلا فان حمولة الضغط سوف تختلف من خط تيار الى خط اخر كما هو واضح في الشكل (11- 4) وبالتالي سيتم حساب التدفق بطريقة أخرى .. حيث سنعتبر كل خط تيار لوحده ومن ثم نكامل على مساحة الفوهة بأكملها. و بالعودة الى المعادلة (-4 30)وبفرض أن $p_0=p$ وبما ان الفتحة كبيرة سوف لن نهمل قيمة السرعة v_0 سيكون التدفق النظري Q_{th} كما توضّح المعادلة (4-31) :



الشكل (11- 4)

$$Q = \int V.dA = \frac{1}{\sin\beta}\int_{h1}^{h2} y\sqrt{V_0^2 + 2gz}\,.dz \qquad (4-31)$$

اما التدفق الحقيقي فسنضرب بمعامل الجريان ϕ ليصبح $Q = \phi.Qth$ وبفرض ان الجدار شاقولي فان β=90 سيكون التدفق الحقيقي من اجل فوهة مستطيلة عرضها b مثل:

$$Q = \varphi.b\sqrt{2g}\int_{h1}^{h2}\left(\frac{V_0^2}{2g} + z\right)^{1/2}.dz \qquad (4-32)$$

وباجراء التكامل بين h_1 و h_2 نحصل :

$$Q = \frac{2}{3}\varphi.b\sqrt{2g}\left(\frac{V_0^2}{2g} + h_2\right)^{3/2} - \left(\frac{V_0^2}{2g} + h_2\right)^{3/2} \quad (4-33)$$

الحالة الثالثة - عندما لا يتدفق سائل الى الخزان :

في هذه الحالة سوف ينخفض مستوى السائل في الخزان ولنفترض ان التدفق الحجمي الذي يتم خلال زمن لا متناهي في الصغر dt هو dV وعندها سينخفض السائل السائل في الخزان بمقدارdh وعليه سيكون التدفق

$$Q = \frac{dV}{dt} = \varphi . A\sqrt{2g . h} \qquad (4 - 34)$$

ان هذا الحجم dv المتدفق خلال الزمن dt يمكن حسابه من انخفاض السائل في الخزان الذي مساحة مقطعه A_0 فرضا فيكون :

$$dV = A_0 . dh$$

بالتعويض نحصل:

$$\frac{A_0 . dh}{dt} = \varphi . A\sqrt{2g . h}$$

وعادة ما نحتاج في هذه الحالة لحساب الزمن اللازم لكي ينخفض السائل من مستوى 1 في الخزان الى مستوى 2 لذلك يمكن ان نحسب الزمن بإصلاح العلاقة السابقة لتصبح:

$$dt = \frac{1}{\varphi . A} . \frac{A_0}{\sqrt{2g . h}} . dh$$

وبالتالي لمعرفة الزمن اللازم نكامل بين h1, h2 نجد :

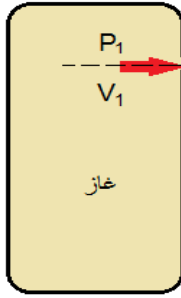
$$t = \frac{2A0}{\varphi . A\sqrt{2g . h}} . \left(\sqrt{h1} - \sqrt{h2}\right) \qquad (4 - 35)$$

واذا طلب منا حساب زمن تفريغ الخزان (أي h2=0)نعوض بقيمة h2=0 في المعادلة السابقة.

4.9.4.2-الجريان من خزان تحت الضغط :

هذا يعني أن الخزان مغلقا ويتعرض لضغط اكبر من الضغط الجوي لذلك نأخذ خط تيار يمر من الفوهة حيث الضغط داخل الخزان p1 والسرعة v1 والضغط خارج الخزان ليكنp2 وسرعة خروج السائل من الفوهة v2 كما في الشكل (12- 4) وبتطبيق معادلة بيرنولي على خط التيار المفترض نجد:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \qquad (4-36)$$

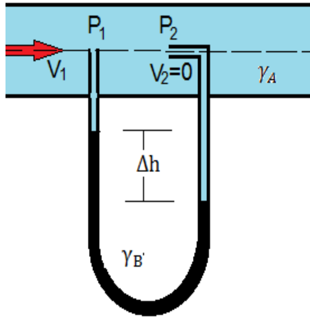


الشكل (12- 4)

باعتبار ان $Z_1=Z_2$ أي خط التيار افقي وموازي لمستوى المقارنة بما أن $V_2>V_1$ بالتالي يمكن ان نهمل V_1^2 امام V_2^2 وعليه نجد:

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \Rightarrow V_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (4-37)$$

4.10-حساب معدل الجريان:



الشكل (13- 4) انبوبة بيتوت

قبل الدخول في طرق حساب الجريان ، من المفيد التعرّف غلى جهاز بسيط يستخدم لقياس سرعة جريان السائل ق الأنابيب ، يُطلق عليه اسم انبوبة بيتوت كما في الشكل (13- 4) . حيث يؤثر على الفرع الأول من الأنبوبة ضغطا يسمى الضغط الستاتيكي بينما يؤثر على الفرع الثاني من الانبوبة ضغطا قيمته تساوي مجموع الضغط الستاتيكي والضغط الديناميكي . ان الفرق بين قيمتي هذين الضغطين يساوي الى الفرق بين حمولتي السرعة باعتبار $\Delta z = 0$ وهذا الفرق يسمى الضغط الديناميكي: أي:

$$P_2 - P_1 = P_{dyn} \qquad (4-38)$$

بتطبيق معادلة بيرنولي على خط التيار المار بمحور الانبوب حيث الوزن النوعي للسائل الجاري هو γ_A وللسائل الموجود في انبوبة بيتوت هو γ_B نجد :

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \qquad (4-39)$$

ولكن $V_2=0$ هي نقطة توقف السائل نجد :

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{P_{dyn}}{\gamma} \qquad (4-40)$$

وكما هو معروف أن السرعة في محور الانبوب ستكون هي السرعة العظمى V_{max} ومنه

$$\frac{V_{max}^2}{2g} = \frac{P_{dyn}}{\gamma_A} \qquad (4-41)$$

أما الضغط الديناميكي فيمكن حسابه بوصل انبوبة بيتوت الى مقياس v نجد ان

$$\Delta p = (\gamma_B - \gamma_A).\Delta h \qquad (4-42)$$

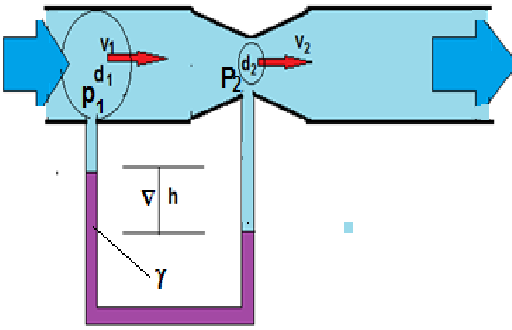
بالتعويض نجد :

$$\frac{V_{max}^2}{2g} = \Delta h\left(\frac{\gamma_B}{\gamma_A} - 1\right) \Longrightarrow$$

$$V_{max} = \sqrt{2g\left(\frac{\gamma_B}{\gamma_A} - 1\right).\Delta h} \qquad (4-43)$$

ب - انبوبة فينتوري:

هي انبوبة تستخدم لقياس التدفق في انبوبة ما وتعتمد على مبدأ اختلاف السرعة نتيجة تغير المقطع تدريجيا، فاذا كانت لدينا المعطيات المبينة على الشكل وبتطبيق معادلة بيرنولي على خط التيار المار في محور الانبوب المتقارب المتباعد نجد



الشكل (14- 4)

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma_1} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma_a} \qquad (4-44)$$

بالإصلاح نجد :

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma_a} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \qquad (4-45)$$

ولكن لدينا من معادلة الاستمرار:

$$Q = V_1.A_1 = V_2.A_2 \qquad (4-46)$$

$$V_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} \quad و \quad V_1 = \frac{4Q}{\pi . d_1^2}$$

بالتعويض:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma_a} = \frac{16Q}{2g\pi . d_2^2} - \frac{16Q}{2g\pi . d_1^2} \qquad (4-47)$$

ولكن من انبوبة U يمكن أن نحسب فرق الضغط Δp حيث:

$$\Delta p = (\gamma_b - \gamma_a) . \Delta h$$

وبالتعويض وإصلاح العلاقات نجد:

$$Q = \frac{\pi}{4}\left(\frac{2g . \Delta h \frac{\gamma_b - \gamma_a}{\gamma_a}}{\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4}}\right)^{1/2} \qquad (4-48)$$

وبالتالي نستطيع حساب التدفق من معرفة الوزن النوعي للسائلين المستخدمين ومعرفة قطري الانبوب المتقارب المتباعد ومعرفة فرق ارتفاع سائل مقياس أنبوبة U

ولكي نحسب السرعة نعوض في علاقة الاستمرار حيث :

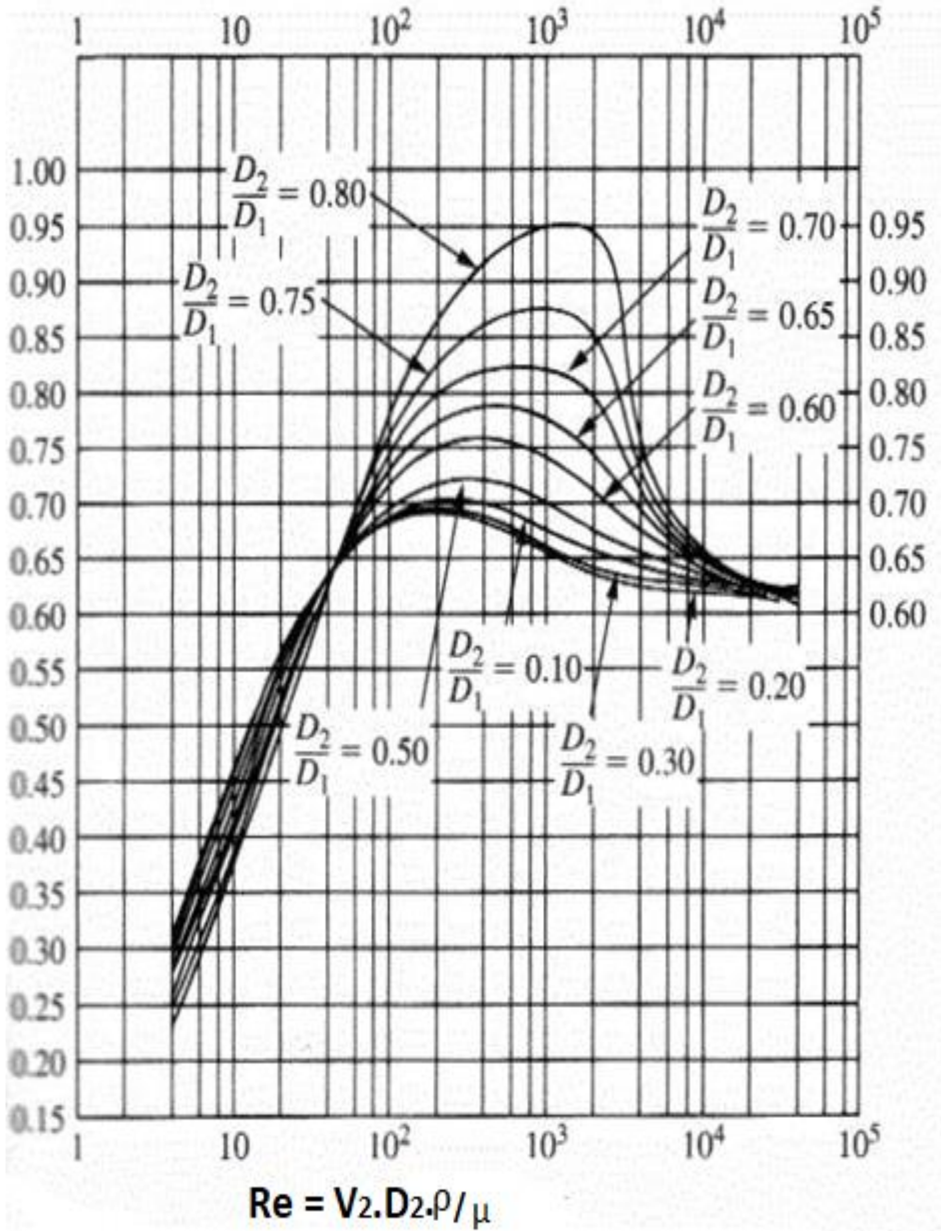
$$Q = V_2 . \pi \frac{d_2^2}{4}$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g . \Delta h(\frac{\gamma b - \gamma a}{\gamma a})}{1 - (\frac{d2}{d1})^4}} \qquad (4-49)$$

ومن اجل السوائل الحقيقية يدخل معامل تصحيح للعلاقات السابقة يسمى معامل مقياس فينتوري C يحتوي هذا المعامل كل المؤثرات التي تميز السائل الحقيقي لتصبح العلاقة :

$$V_2 = C . \sqrt{\frac{2g . \Delta h(\frac{\gamma b - \gamma a}{\gamma a})}{1 - (\frac{d2}{d1})^4}} \qquad (4-50)$$

تم حساب هذا المعامل *C* تجريبياً وثبتت قيمه في جداول ومخططات خاصة حيث يمكن إيجاد قيمته بالنسبة لرقم *Re* مع الأخذ بعين الاعتبار النسبة بين القطرين d_1 و d_2 ولا بد من الإشارة إلى أن المخطط الموجود هو مخطط نصف لوغاريتمي وهو كما يوضح الشكل (15- 4) :



الشكل (15- 4) معامل مقياس فينتوري

ج - المقياس الدَّوار:

وهو مقياس يستخدم لمعرفة التدفق عن طريق وصله مع أنبوبة التدفق الرئيسية المراد معرفة التدفق فيها ويعتمد على مبدأ : أن وزن الطوّاف يجب أن يتوازن مع قوة فرق الضغط كما يوضح الشكل (16- 4) ، إن القوى المؤثرة على الطواف هي:

1- وزن الطواف الظاهري:

$$V_s(\gamma_s - \gamma_a) \qquad (4-51)$$

حيث : Vs هو حجم الطوّاف

2- قوة الضغط الجانبي على سطح الطوّاف

$$A_s(P_1 - P_2) \qquad (4-52)$$

عندما تتساوي هاتين القوتين يتوازن الطوّاف ويتوقف عن الحركة أي:

$$V_s(\gamma_s - \gamma_a) = A_s(P_1 - P_2) \qquad (4-53))$$

كل القيم في هذه المعادلة يفترض أن تكون معروفة كحجم الطوّاف ومساحة مقطعه والأوزان النوعية ما عدا فرق الضغط ΔP لذلك نطبق معادلة برنولي بين مدخل السائل إلى الطواف حيث السرعة V_1 وبين المنطقة التي يقع عندها الطوّاف حيث أن سرعة السائل الذي يعبر حول الطوّاف V_2 نجد:

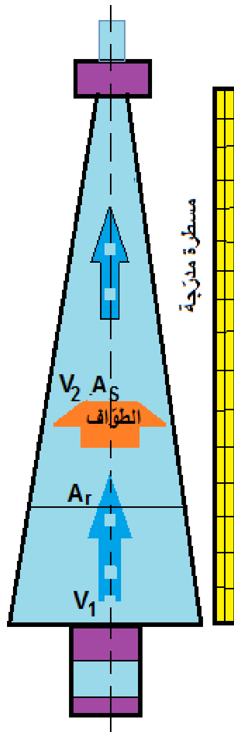
$$\frac{v_1{}^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2{}^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (*)$$

فإذا كان سطح مقطع المقياس Ar والسطح بين الطواف وجسم المقياس Aa فإننا نجد :

$$v_1.Ar = v_2.Aa \Rightarrow v_1 = v_2\frac{Aa}{Ar}$$

بالتعويض في علاقة برنولي (*) نجد:

$$\frac{v_2{}^2 Aa^2}{2gAr^2} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2{}^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$



الشكل (16- 4)

وبإصلاح هذه العلاقة:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma a} = \Delta z + \frac{v_2{}^2}{2g}\left(1 - \frac{Aa^2}{Ar}\right) \qquad (4 - 54)$$

نعود للمعادلة (*) لنعوض قيمة P_2 و P_1 من علاقة توازن الطواف بعد اهمال الفرق في الارتفاع نجد:

$$\frac{Vs(\gamma s - \gamma a)}{As.\gamma a} = \frac{v_2{}^2}{2g}\left(1 - \frac{Aa^2}{Ar^2}\right) \qquad (4 - 55)$$

وباصلاح هذه العلاقة يمكن حساب السرعة V_2 نجد:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gVs(\gamma s - \gamma a)}{\gamma a.As\left(1 - \frac{Aa^2}{Ar^2}\right)}} \qquad (4 - 56)$$

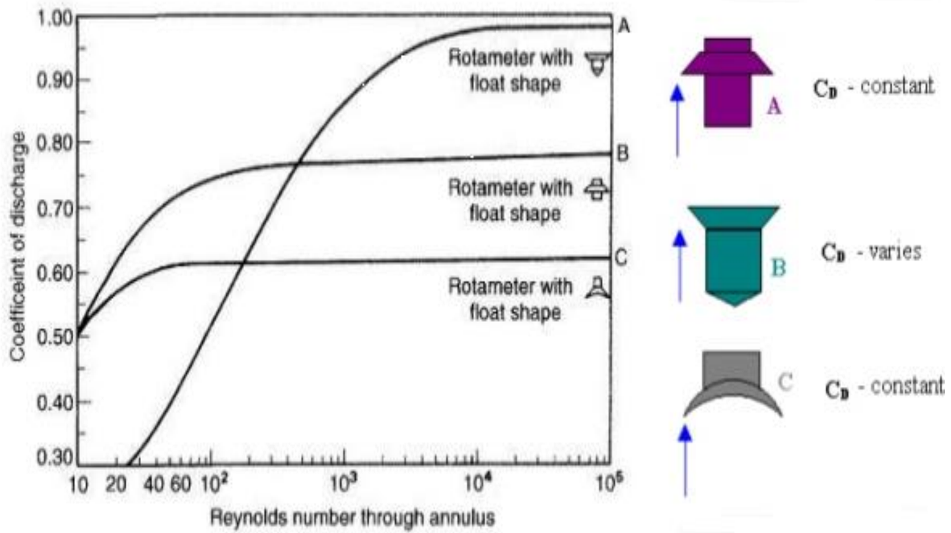
ولحساب التدفق نضرب السرعة V_2 بمساحة الفراغ حول الطواف حيث يعبر السائل وهذه القيم هي Aa ... ومن اجل السائق الحقيقي ندخل معامل تصححيح يسمى معامل المقياس الدوار Cr لتصبح العلاقة:

$$Q = Cr.Aa\sqrt{\frac{2gVs(\gamma s - \gamma a)}{\gamma a.As\left(1 - \frac{Aa^2}{Ar^2}\right)}} \qquad (4 - 57)$$

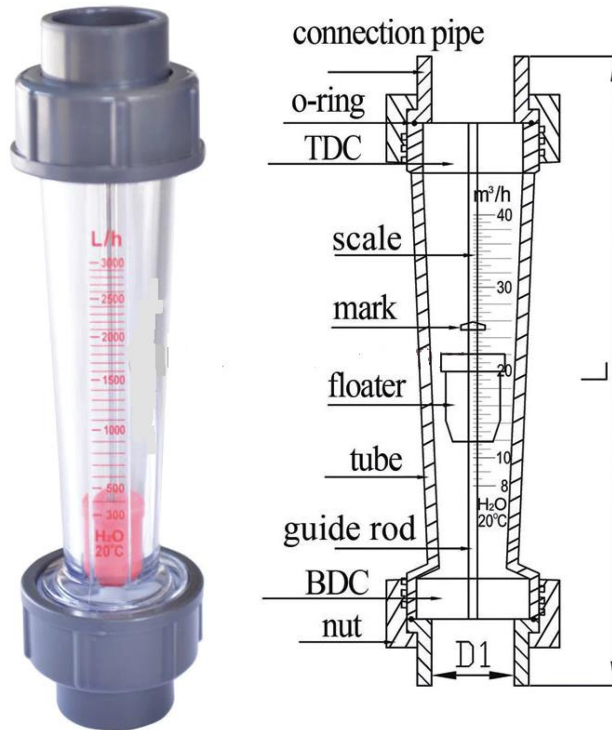
ان القيمة $\frac{Aa^2}{Ar^2}$ عادة ما تكون صغيرة جدا بالنسبة للواحد ولذلك يمكن اهمالها لتصبح العلاقة:

$$Q = Cr.Aa\sqrt{\frac{2gVs(\gamma s - \gamma a)}{\gamma a.As}} \qquad (4 - 58)$$

ويعطى معامل التصحيح C_r بجداول خاصة وذلك حسب نوعية الطّواف وشكله ولدينا مخططات بيانية تُعطي قيمة C_r بالنسبة Re وهو أيضا مخطط نصف لوغاريتمي له شكل التقريبي كما هو موضح في الشكل (17 - 4) :



الشكل (17 – 4) معامل التصحيح C_r مع Re للمقياس الدّوار



الشكل (18 – 4) المقياس الدوار مع توضيح تخطيطي

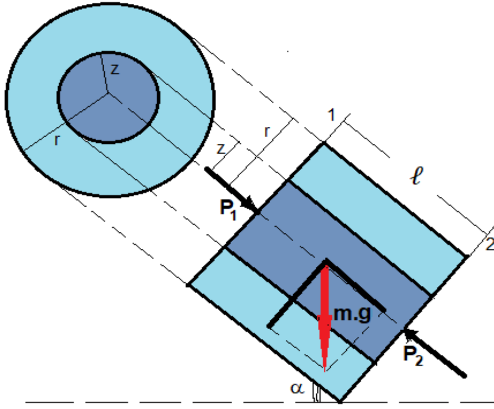
الفصل الخامس

الجريان في الأنابيب ذات المقطع الدائري

(الجريان وحيد البعد)

5.1-الجريان الصفحي في الأنابيب الدائرية المقطع (حساب حمولة الاحتكاك):

لنأخذ أنبوبا من سائل تحت تأثير وزنه ونحدد مقطعين 1 و 2 لتصبح لدينا اسطوانة طولها ℓ بين المقطعين ونصف قطرها r وتميل عن الأفق بزاوية α ، ولنأخذ اسطوانة داخل الأنبوبة السابقة نصف قطرها Z محورها ينطبق على محور الأنبوبة الأصلية كما في الشكل (1 - 5) ، إن وزن هذه الاسطوانة سيكون m.g حيث m هي كتلة السائل و g هي الجاذبية ... وكما هو معلوم أن سرعة السائل ستكون أعظمية V_{max} عند محور الاسطوانة وسوف تتناقص هذه السرعة لتصل الى الصفر عند جدار الأنبوب. ولنعتبر أن الضغط على مقطع الأسطوانة 1 هو P_1 والضغط على مقطع الأسطوانة 2 هو P_2 وبالتالي فإن محصلة القوى **P** الكلية باتجاه محور الأنبوب ستكون كما يلي



الشكل (1 - 5)

$$\mathbf{P} = \pi z^2(p_1-p_2) + m.g.\sin\alpha \qquad (5-1)$$

ولكن كتلة الأسطوانة m ما هي إلّا جداء كثافة السائل ρ بحجم هذه الاسطوانة السائلة **V** أي أن :

$$\mathbf{m = \rho.V} = \pi z^2.\ell.\rho \qquad (5-2)$$

وكذلك فإن $\sin\alpha$ ما هي إلا النسبة $\frac{h}{\ell}$ التي تسمى التدرج الهندسي .

بالتعويض بهذه القيم نجد :

$$P = \pi z^2(p_1-p_2) + \pi z^2.\ell.\rho.g.\frac{h}{\ell} \qquad (5-3)$$

$$P = \pi z^2.\rho.g.\ell\left(\frac{P_1-P_2}{\gamma.\ell} + \frac{h}{\ell}\right) \qquad (5-4)$$

وعندما تكون مميزات الجريان ثابتة على طول الأنبوب فإن القيم $\frac{P_1-P_1}{\gamma.\ell}$ وستكون

$\sin\alpha=\frac{h}{\ell}$ ستكون ذات قيم ثابتة . نسمي ما داخل القوسين أي $\left(\frac{P_1-P_2}{\gamma.\ell}+\frac{h}{\ell}\right)$

بالتدارج ويرمز له بالرمز **i**

ومن ناحية ثانية فإن قوى اجهادات القص على السطوح الجانبية للأسطوانة السائلة المفترضة لها محصلة ولتكن T ويمكن معرفة قيمتها من علاقة نيوتن :

$$T=\tau\,.\,A \qquad (5\text{ -}5)$$

حيث :

τ : الإجهاد المماسي ويعطى بالعلاقة : $\boldsymbol{\tau}=\mu\frac{\boldsymbol{du}}{\boldsymbol{dZ}}$ كما هو معروف سابقا

A : هي مساحة السطح الجانبي للأسطوانة $A=2\pi.z.\ell$

وبالتالي :

$$T=\mu\frac{du}{dZ}\,.\,2\pi.z.\ell \qquad (5-6)$$

وبما أن الجريان دائم ، أي أنه لا تغير في السرعة وبالتالي التسارع معدوم يمكن لأن نجزم ان مجموع القوى المؤثرة على الاسطوانة السائلة والتي تساوي قوة العطالة المساوية للصفر بسبب انعدام التسارع , وبالتالي سيكون مجموع القوى مساويا للصفر أي :

$$P+T=0$$

$$\pi.\,z^2.\gamma\,.\,\ell\,.i+2\pi.\,z\,.\ell\,.\mu\,.\frac{du}{dZ}=0 \qquad (5-7)$$

ومنه :

$$\frac{du}{dZ}=-\frac{\gamma\,.i}{2.\mu}z \qquad (5-8)$$

إن هذا الاستنتاج صحيح , حيث أن القيمة سالبة وذلك لأن السرعة تنخفض من محور الأنبوبة إلى محيط الاسطوانة السائلة المفترضة . ومنه نجد :

$$du=\frac{\gamma\,.i}{2.\mu}z\,.\,dz \qquad (5-9)$$

وبإجراء التكامل اللامحدود نجد :

$$u=\frac{\gamma\,.i}{4\,.\mu}\,.\,z^2+C \qquad (5-10)$$

ولمعرفة ثابت التكامل C نعود للشروط الحدية وذلك على جدار الأنبوب حيث z = r وحيث تكون السرعة بجانب جدار الأنبوب مساوية للصفر أي $u = 0$

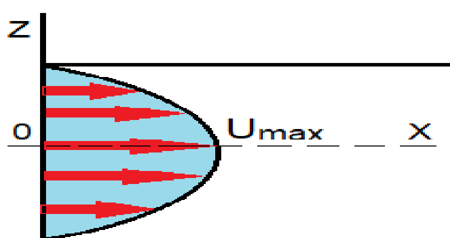
وبالتالي :

$$C = \frac{\gamma . i}{4 . \mu} r^2 \qquad (5 - 11)$$

وبالتعويض نجد :

$$u = \frac{\gamma . i}{4 . \mu} (r^2 - z^2) = \frac{g . i}{4\nu} . (r^2 - z^2) \qquad (5 - 12)$$

حيث : $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ اللزوجة الحركية

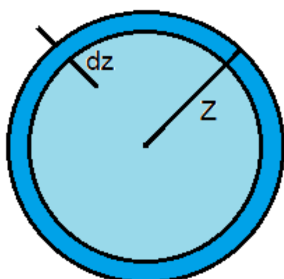


الشكل (5 - 2)

كما مر معنا سابقا فإن المعادلة السابقة هي معادلة قطع مكافئ دوراني تنطبق ذروته على محور الأنبوب كما في الشكل (5 - 2)وتكون السرعة أعظمية في محور الأنبوب أي عندما Z=0 أي :

$$u_{max} = \frac{\gamma . i}{4 . \mu} . r^2 = \frac{g . i}{4\nu} . r^2 \qquad (5 - 13)$$

ولحساب التدفق: نأخذ شريحة حلقية نصف قطرها z وسماكتها dz كما في الشكل (5 - 1) إن التدفق من خلال هذه الشريحة يحسب بالمعادلة :



الشكل (5 - 3)

$$dQ = u . dA \qquad (5 - 14)$$

$$dQ = u . 2\pi . z . dz = \frac{\pi . i . g}{2 . \nu} (r^2 z - z^3) dz \qquad (5 - 15)$$

$$Q = \frac{\pi . i . g}{2 . \nu} \int_0^r (r^2 z - z^3) dz = \frac{\pi . i . g}{8 . \nu} . r^4 \qquad (5 - 16)$$

أي : يتناسب التدفق في الجريان الصفحي مع الأس الرابع لنصف قطر الأنبوب r ومع التدارج i ، تسمى العلاقة الأخيرة باسم علاقة **(بوازيل)** .

ولتحديد قيمة السرعة الوسطى في الأنبوب W والتي هي

$$W = \frac{Q}{A} \qquad (5-17)$$

نجد بالتعويض :

$$W=\frac{\frac{\pi . i . g}{8.\nu} . r4}{\pi r^2}=\frac{. i \ . g}{8.\nu} \ . \ r^2 \qquad (5-18)$$

وبملاحظة بسيطة تجد أن W تساوي نصف u_{max} وعليه يمكن أن نستنتج قيمة التدارج i من خلال معرفة السرعة الوسطىW أي :

$$i = W. \frac{8\nu}{g \ .r^2} \qquad (5-19)$$

ملاحظة هامة : لو استخدمنا معادلة بيرونوللي في الجريان الدائم بين المقطعين 1 و 2 وبالقسمة على ℓ طول الأنبوبة بين المقطعين نجد :

$$i = \frac{P_1 - P_2}{\gamma \ .\ell} + \frac{z_1 - z_2}{\ell} = \frac{h_f}{\ell} \qquad (5-20)$$

حيث W2=W1 في الجريان الدائم و h_f هي الضياعات بالاحتكاك عند حركة السائل .

وبالعودة إلى الشكل نعرف أن $z_1 = z_2 = h$ وهذا يعبر عن فرق الارتفاع بين المقطعين 1 و 2ومن المعادلة الأخيرة فإن $i = \frac{h_f}{\ell}$ وبالتعويضi بقيمة نجد :

$$h_f = i \ .\ell = W \ \frac{8.\nu.\ell}{g.r^2} \qquad (5-21)$$

من هذه المعادلة نستنتج :

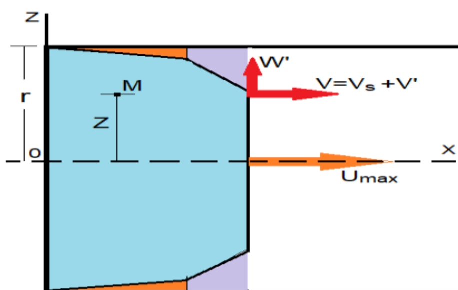
إن التدارج شرطاً لازماً لإبقاء الجريان مستمراً في الجريان الصفحي للسوائل الحقيقية

5.2-الجريان المضطرب في الأنابيب الدائرية المقطع:

لنأخذ جزيء من السائل وليكن M يقع في منطقة الاضطراب في جريان مضطرب في أنبوب دائري المقطع وليكن بعد هذا الجزيء عن محور الأنبوب مسافة Z كما في الشكل (4 - 5) وليكن قطر هذا الأنبوب هوr سوف نلاحظ ما يلي: إن الجزيء يتحرك بسرعة وسطية باتجاه حركة التيار وسوف يتحرك كذلك بسرعة اضطرابية للأمام وللخلف وللأعلى وللأسفل أي أن هناك سرعة إضافية سنسميها سرعة الاضطراب وسيكون لها مركبتين :

- المركبة الأولى ولتكن `v باتجاه المحورox (يمكن أن تكون موجبة و يمكن أن تكون سالبة)

- المركبة الثانية ولتكن w` باتجاه المحورoz
اضافة إلى السرعة الوسطية الدائمة باتجاه المحور ox والتي تتم مع حركة التيار ولنرمز لها ب V_S .
وبالتالي :



الشكل (5 - 4)

سوف تصبح السرعة الفعلية بالاتجاه المحوري هي : $V = Vs + V'$

وستكون السرعة الفعلية بالاتجاه القطري هي: $W` = W$

وعندما تكون $r = Z$ أي على جدار الأنبوب سيكون: $W` = V` = Vs = 0$

وبالعودة مرّة أخرى إلى الأسطوانة من المائع والتي طولها L ونصف قطرها Z ولنحاول أيجاد القيم الوسطية للسرعة المحورية V وللسرعة القطرية W وذلك بإجراء التكامل على سطح هذه الأسطوانة A:

$$\bar{V} = \frac{1}{A}\int (V_s + V`).dA = \frac{1}{A}\int Vs.dA + \frac{1}{A}\int V`.\,dA \qquad (5-21)$$

$$\bar{W} = \frac{1}{A}\int W`.\,dA \qquad (5-22)$$

يجب الانتباه إلى أنه خلال حركة الجزيء لابد ان تكون سرعته مساوية للصفر في لحظة ما خلال الجريان بمعنى أن مركبات سرعة الاضطراب سوف تساوي الصفر في هذه اللحظة:

$$\bar{V} = \frac{1}{A}\int V`.\,dA = 0 \quad , \quad \bar{W} = \frac{1}{A}\int W`.\,dA \qquad (5-23)$$

فلو طبقنا قانون كمية الحركة على كتلة المائع الموجودة بين مقطعي هذه الأسطوانة والذي يقول:

إن مجموع القوى الخارجية المؤثرة على الأسطوانة المائعة سوف يساوي إلى الفرق في كمية حركة السائل الداخل والخارج منها.

حيث أن القوى الخارجية هي:

$$P = \pi Z^2.\gamma.\ell.\,i \qquad (5-24)$$

$$T = \mu\int \frac{dVs}{dZ}.\,dA = \mu\frac{dVs}{dZ}.\,2\pi Z.\ell \qquad (5-25)$$

إن الفرق في كمية الحركة في الجريان الصفحي مساوياً للصفر، أما في الجريان المضطرب فإن هناك تبادلاً في كمية الحركة بالاتجاه القطري نتيجة الذبذبات والحركة التي تقوم

بها الجزيئات بالاتجاه القطري ، حيث أن هذه الحركة معدومة في الجريان الصفحي.

إن كتلة المائع التي تنتقل بالاتجاه القطري هي ρ.dA.w` وبالتالي فإن كمية الحركة لهذه الكتلة ستكون بالاتجاه المحوري : ρ.dAw`(vs+v`) وبإجراء التكامل على كامل السطح A :

$$\rho\int w`\,(v_s+v`)\,dA$$

$$= \rho\, v_s\int w`.\,dA + \rho\int v`.\,w`.\,dA = \rho\int v`.\,w`.\,dA \qquad (5-26)$$

وذلك لأن الحد $\rho\, v_s\int w`.\,dA$ يساوي الصفر حيث أن السائل لا يمكن أن يخرج من جوانب الأسطوانة إن القيمة v`.w` سوف تختلف دائماً عن الصفر وذلك لأن:

توضيح: عندما يتحرك الجزيء باتجاه الجدار قطرياً بسرعة W` موجبة فإنه يتحرك بنفس الوقت باتجاه محوري بسرعة Vs ولكنه انتقل من طبقة قريبة من المحور إلى طبقة قريبة من الجدار أي أن سرعته المحورية سوف تنخفض وبالتالي وتحت تأثير السرعة W` والسرعة Vs سيكون للجزيء سرعة موجبة أقل من Vs باتجاه المحور OX وستساوي V`.

وبالعكس: عندما يتحرك الجزيء من الجدار باتجاه المحور بسرعة W`- سالبة عكس اتجاه OZ سوف ينتقل الجزيء من طبقة سرعتها منخفضة إلى طبقة سرعة جزيئاتها أكبر وبالتالي سوف يخلق هذا الجزيء حالة فرملة أي ستكون سرعته سالبة أي V`- سالبة.

وفي كلتا الحالتين فإن الجداء V`.W` موجب وله القيمة:

$$\overline{V`.\ W`} = \frac{1}{A}\int v`.\,w`.\,dA \qquad (5-27)$$

وعليه فإن كمية الحركة الكلية باتجاه المحور OX والتي تترك الجدار من الأسطوانة المائعة :

$$\rho\int \overline{v`.\,w`}.\,dA = \rho\,\overline{v`.\,w`}.2\pi.Z.\ell \qquad (5-28)$$

وبتطبيق قانون كمية الحركة نجد:

$$\pi Z^2.\boldsymbol{\nu}.\ell.\ i + \mu\int \frac{dVs}{dZ}.2\pi\, Z.\ell = \rho\,\overline{v`.\,w`}.2\pi.Z.\ell \qquad (5-29)$$

وبعد اختصار القيم المساوية من الطرفين يمكن أن نحسب : $\overline{V`.W`}$

$$\overline{V`.W`} = \frac{z.g.i}{2} + \nu\frac{dVs}{dZ} \qquad (5-30)$$

لو أمعنا النظر إلى الحد $\nu \frac{dVs}{dZ}$ لوجدنا أن له نفس أبعاد $\frac{\tau}{\rho}$ أي أن الطرف الأيمن من هذه المعادلة له أبعاد إجهاد قص مقسوماً على كثافة وهذا يعني أن الاضطراب أو التذبذبات تسبب إجهاد قص يسمى إجهاد القص المضطرب يؤدي إلى تفلطح منحني السرعة قرب محور الأنبوب.

وقد وجد أن نسبة السرعة الوسطى إلى السرعة العظمى في الجريان المضطرب تساوي 0.8 بينما في الجريان الصفحي فإن هذه النسبة تساوي 0.5.

5.3-ضياعات الحمولة عند الجريان في الأنابيب الدائرية المقطع:

تقسم هذه الضياعات إلى ثلاثة أقسام:

1- ضياعات نتيجة الاحتكاك
2- ضياعات موضعية
3- ضياعات ذاتية

5.3.1-الضياعات نتيجة الاحتكاك:

لقد بينت التجربة أن ضياعات الحمولة نتيجة الاحتكاك h_f عند جريان السائل في أنبوب دائري المقطع تتعلق بعدة عوامل أهمها هي التالية :

1- قطر الأنبوب d
2- طول الانبوب L
3- صفات السائل الفيزيائية كالكثافة واللزوجة
4- السرعة الوسطى لحركة السائل في الانبوب W

وقد استطاع العالم دارسي استناداً لمبادئ التحليل البعدي واستناداً للتجربة أن يتوصل إلى علاقة هامة جداً نستطيع بواسطتها أن نحسب الضياعات نتيجة الاحتكاك وهي:

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} . \frac{W^2}{2g} \qquad (5 - 31)$$

حيث λ هي ثابت يسمى معامل الاحتكاك وهو ثابت لا بعدي.

ومن البديهي أن نلاحظ أن كل المتغيرات في المعادلة السابقة يمكن معرفتها بسهولة ما عدا معامل الاحتكاك λ حيث ان معرفته تمكننا من معرفة ضياعات الاحتكاك أو ما يطلق عليها اسم الضّياعات الخطية أيضاّ.

ولقد وجد أن هذا المعامل λ يختلف حسب طبيعة الجريان من صفحي إلى مضطرب وبالتالي فهو يتبع بشكل مباشر إلى رقم (Re) كما أنه سوف يختلف حسب طبيعة مادة

تصنيع الأنابيب الناقلة للسوائل وخاصة في حالة الجريان المضطرب. لذلك سوف نحاول إيجاد هذا المعامل حسب كل حالة من هذه الحالات.

5.3.1.1- في حالة الجريان الصفحي:

لقد وجدنا أن الضياعات في الاحتكاك في حالة الجريان الصفحي تعطى بالعلاقة:

$$h_f = i \cdot L = w\,\frac{8\nu.\ L}{g\ .r^2} = w\,\frac{32.\nu\ .L}{gd^2} \qquad (5-32)$$

وبالمساواة بين هذه العلاقة وعلاقة دارسي نجد أن:

$$\lambda_{Lam} = \frac{64\ \nu}{w.d} = \frac{64\mu}{p.w.d} = \frac{64}{Re} \qquad (5-33)$$

هذه العلاقة تصلح فقط في الجريان الصفحي أي عندما يكون $Re<2300$

ولابد من التذكير هنا إلى أن نوعية الأنابيب ليست ذات أهمية في الجريان الصفحي ولا تؤثر على λ .

5.3.1.2-في حالة الجريان مضطرب والانابيب ملساء :

كذلك الأمر فإنه في حالة الأنابيب ملساء فإن العامل الاهم الذي يؤثر على قيمة λ هو رقم Re وقد سعى الكثير من الباحثين لإيجاد قيمة λ حسب قيم Re ووضعوا العديد من المعادلات الرياضية والمخططات البيانية التي تربط قيم λ بقيم Re ومن أهمها:

a. ***علاقة بلازيوس:*** وهي تصلح من أجل قيم $100000>Re>80000$

$$\lambda = \frac{0.3164}{(Re)^{\frac{1}{4}}} \qquad (5-34)$$

الضياعات بالاحتكاك كما فعلنا في حالة الجريان الصفحي سنجد:

$$h_f = \frac{0,3164}{Re^{\frac{1}{4}}} \times \frac{L}{d} \times \frac{w^2}{2g} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\frac{d.w}{\nu}}} \times \frac{w^2.L}{2g.d} \quad (5-35)$$

وبالإصلاح لهذه المعادلة نجد:

$$i = \frac{h_f}{L} = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{\frac{d.w}{\nu}}} . \frac{w^{7/4}}{2g\ .d} \qquad (5-36)$$

نلاحظ أن تدرج الضياعات i يتناسب مع الأس $\frac{7}{4}$ للسرعة الوسطية بينما يتناسب مع الأس 1 للسرعة الوسطية في حالة الجريان الصفحي، وهذا يعني أن الضغط يتناقص بشكل أكبر على طول الانبوب في حالة الجريان المضطرب.

b. ***علاقة شيلر:*** وهي تصلح من اجل قيم $2x10^6 > Re > 2x10^4$

$$\lambda = 0.0054 + 0.396(Re)^{-0.3} \qquad (5-37)$$

c. ***علاقة نيكورادسي :*** تستخدم من أجل قيم $10^8 > Re > 10^5$

$$\lambda = 0.0032 + 0.221\ (Re)^{-0.237} \qquad (5-38)$$

d. ***علاقة كوناك :*** تستخدم من أجل قيم $10^8 > Re > 10^3$

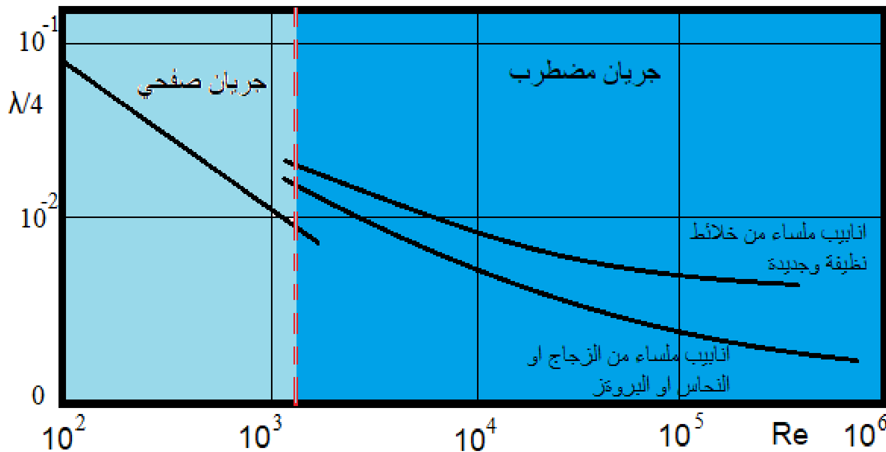
$$\lambda = (1.8 \times \log Re - 1.5)^{-2} \qquad (5-39)$$

كما تتوفر مخططات بيانية تعطي قيم λ مقابل قيم Re وهي للأنابيب الملساء والجريان المضطرب ويمكن ان نلاحظ على الجانب الأيسر للمخطط كيف تتغير قيمة λ مع Re بالنسبة للجريان الصفحي.

e. علاقة كارمن : التي تظهر بالصيغة التالية :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\log(Re\sqrt{\lambda}) - 0.8 \qquad (5-40)$$

وبناءً على هذه العلاقة تم وضع المخطط التالي :

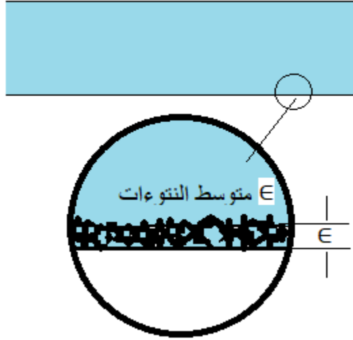


الشكل (5 – 5) علاقة معمل الاحتكاك λ برقم رينولدز Re

5.3.1.3-في حالة الجريان مضطرب والأنابيب الخشنة :

إن لخشونة الأنابيب أهمية بالغة في تحديد قيمة λ في الجريان المضطرب وهذا ما لم نلاحظه في الأنابيب الملساء أو في حالة الجريان الصفحي ..أما مفهوم الخشونة

فنوضحه باختصار: أن الأنابيب مهما بلغت من النعومة فلابد أن يوجد فيها تعرجات وخدوش مجهرية وخاصة بعد فترة من الاستعمال وعادة ما يسمى وسطي ارتفاع الخدوش باسم الخشونة المتوسطة و يرمز لها بالرمز ∈ وتسمى النسبة بين الخشونة المتوسطة و قطر الانبوب باسم الخشونة



الشكل (5 - 6)

النسبية و يرمز لها بالرمز n أي : $n = \frac{\epsilon}{d}$ ويبيّن الشكل (5 - 6) صورة مكبرة جدا لجزء مجهري للسطح الداخلي لأنبوب حيث يظهر مجهريا أن هناك نتوءات وتعرجات أبعادها صغيرة جدا و يمكن أن لا ترى بالعين المجردة إلا أنها تلعب دورا مهما في تحديد قيمة معامل الاحتكاك λ وخاصة في الجريان المضطرب .وعليه فإن قيمة λ ستتبع رقم Re والخشونة النسبية n أي : $\lambda = f(Re, n)$

إن من أهم الباحثين لهذه الحالة هو العالم نيكورادسي حيث أوجد العلاقة التجريبية التالية :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.\log\frac{\varepsilon}{d_{ekv}} + 1.71 \qquad (5 - 41)$$

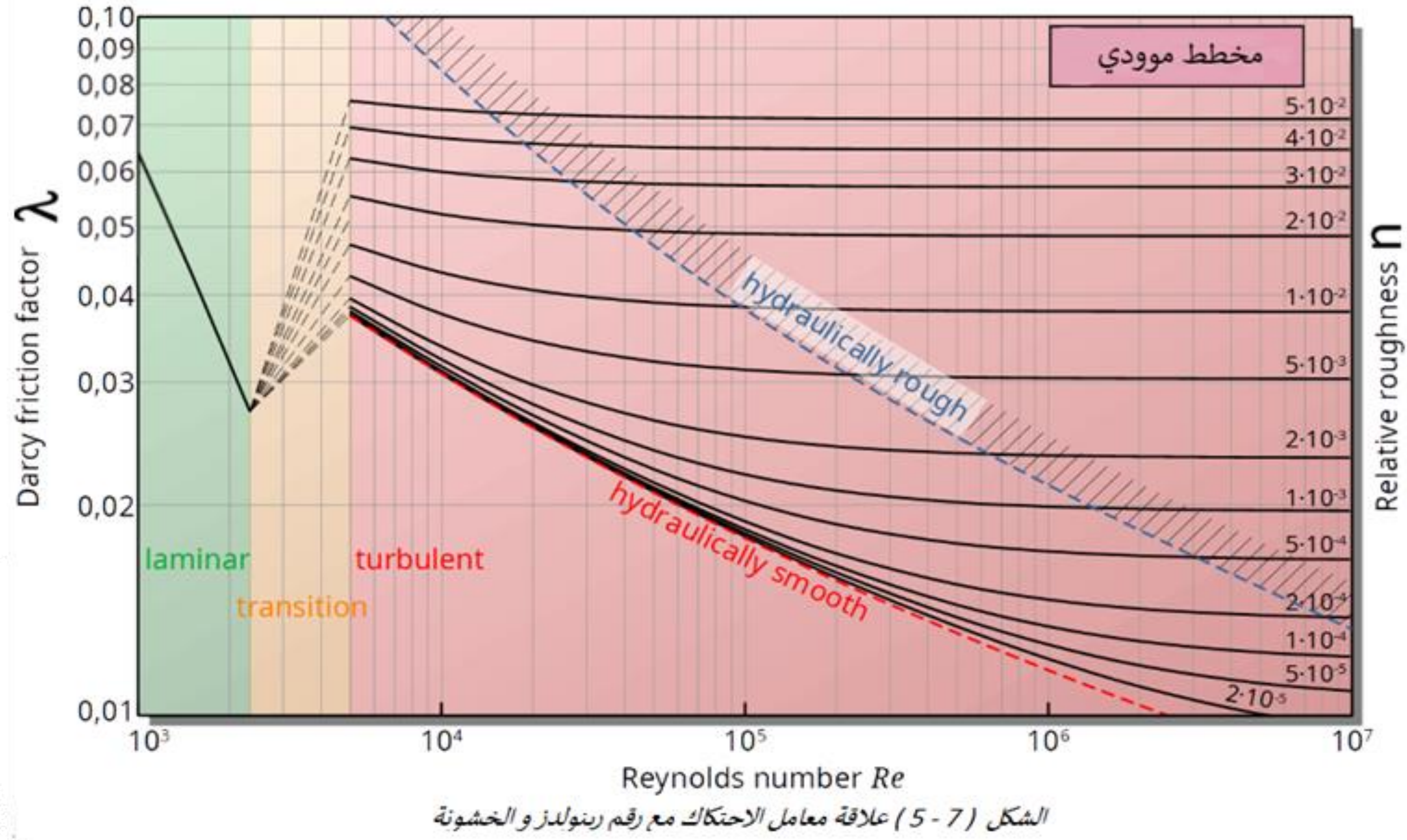
حيث d_{ekv} - هو القطر المكافئ للأنبوب .

ويستخدم القطر المكافئ عندما يكون الجريان في أنابيب ليست دائرية المقطع حيث يدخل مفهوم نصف القطر الهيدروليكي

$$d_{ekv} = \mathbf{4}\sqrt{h}r_h = \frac{A_r}{O_L} \qquad (5 - 42)$$

حيث A_r : هو المقطع الحي و O_L : هو المحيط المبلل فقط .

وقد نُقلت هذه المعادلة و رُسمت كمخطط بياني شهير جداً يُطلق عليه مخطط **موودي** ، كما يبيّن الشكل (5 - 7) :



الشكل (7 - 5) علاقة معامل الاحتكاك مع رقم رينولدز و الخشونة

وقد وُضعت بعض الجداول التي يمكن أن تُعطي الخشونة النسبيّة لبعض الأنواع من الانابيب حسب قطرها و حسب المادة المصنوعة منها كما يُبيّن الجدول (1 – 5) :

الخشونة النسبية %(n)	القطر الداخلي للانبوب مم (m.m)					
	نوع A	نوع B	نوع C	نوع D	نوع E	نوع F
0.2	أكبرمن 8.9	1828	-	-	-	-
0.45	....	1220-1676	-	-	-	-
0.81	....	356-1067	762	1220-2240	2440	5590
1.35	....	168-324	254-610	508-1220	1067-2440	2134-5090
2.10	....	114-142	168-219	324-406	610-915	1220-1828
3.0	....	61-89	89-142	142-273	254-508	508-1067
3.8	5.0	48	61	89-114	175-229	406-457
4.8	....	33-42	48-61	61-74	122-175	254-356
6.0	....	27	42	18	97	203
7.2	....	21	33	42	60	127

النوع - **A** – الأنابيب المسحوبة من البرونز – القصدير – الرصاص – الزجاج.
النوع - **B** – الأنابيب الفولاذية النقية والأنابيب الحديدية
النوع - **C** – الأنابيب المحضرة بوساطة الطلاء الكهربائي .
النوع - **D** – الأنابيب المحضرة من الخلائط الجيدة.
النوع - **E** – الأنابيب المحضرة من الخلائط متوسطة الجودة والأنابيب والوصلات الإسمنتية
النوع - **F** – التوصيلات من المواد ذات المواصفات الجيدة من البورسلان.

الجدول (1- 5) الخشونة النسبية حسب نوعية و أقطار الانابيب

5.4-الضياعات الموضعية:

الضياعات الموضعية هي تلك الضياعات التي تتم بسبب تغيّر سرعة الجريان نتيجة وجود بعض العوائق أو التفصيلات في طريق الجريان مثل الأكواع أو الصمامات أو تضيق مفاجئ أو توسع وقد أثبتت التجربة و الدراسة التحليلية أن الضياعات الموضعية تتناسب مع مربع السرعة كما هو الحال في حالة الضياع بالاحتكاك أي :

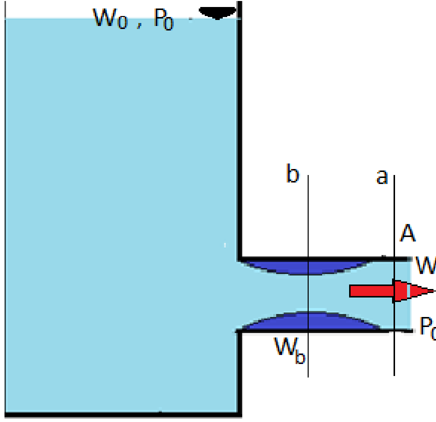
$$h_L=K\frac{V^2}{2g} \qquad (5-43)$$

حيث k–مقدار ثابت يعتمد على نوع العائق الذي يسبب الضياع .

من الملاحظ من خلال المعادلة السابقة أن واحدة قياس h_L هي واحدة الطول و بالنظر للطرف الثاني من المعادلة نجد أن k ثابت عديم الواحدة (لا بعدي) وعادة ما يرمز له بالرمز ζ

وسوف ندرس بعض الحالات الخاصة التي تحدث فيها ضياعات موضعية .

5.4.1-الضياعات الموضعية أثناء جريان السائل من خزان ذي ميزاب:



الشكل (8 - 5)

عندما يخرج السائل من الخزان بواسطة الأنبوبة الجانبية الميزاب تتشكّل لحظة الخروج منطقة دوّامات ويحصل رص لمقطع الجريان ثم لا يلبث و أن يتوسع المقطع ليأخذ نفس مقطع الأنبوب كما يبيّن الشكل (8 - 5)

فإذا كان الضغط عند مخرج الميزاب P_0 فإن الضغط عند منطقة الرص P_b سيكون أقل وذلك لأن سرعة تدفق السائل في هذه المنطقة ستكون أكبر أي $P_b<P_0$ ولقد وجدنا سابقا من قانون تورشيللي أن :

$$Q = A.W = \sqrt{2gh} \qquad (5-44)$$

ولكن في حقيقة الأمر فإن التدفق الفعلي سيكون أصغر من التدفق النظري بسبب صدم السائل الخارج للسائل الساكن المتوضع حول المقطع المرصوص وهنا سوف يتم ضياع في القدرة ، ولحساب هذا الضّياع نطبق قانون كمية الحركة على المائع المحصور بين المقطعين ونفترض أن الجريان دائم :

$$(P_b - P_a)A = \rho Q(W - W_b) = \rho AW(W - W_b) \qquad (5-45)$$

ومنه نستنتج :

$$\frac{P_b - P_a}{\gamma} = \frac{W^2 - W_b.W}{g} \qquad (5-46)$$

وبتطبيق معادلة بيرنوللي على الجزء من الميزاب مع اهمال الضياعات الخطية باعتبار أن طول الميزاب قصيرا نجد:

$$\frac{P_b - P_a}{\gamma} = \frac{W^2 - W_b^2}{2g} + h_L \qquad (5-47)$$

من العلاقتين السابقتين نجد:

$$h_L = \frac{(W_b - W)^2}{2g} = \frac{W^2}{2g}(\frac{W_b}{W} - 1)^2 = \zeta \frac{W^2}{2g} \qquad (5-48)$$

حيث استعضنا عن $(\frac{W_b}{W} - 1)^2$ بالثابت ζ الذي يدل على معامل الضياعات الموضعية ولكن وكما نعرف من معادلة الاستمرار فإن:

$$A.W = A_b.W_b \qquad (5-49)$$

حيث A_b هو مساحة المقطع المرصوص

ونظراً لأن $\varepsilon = \frac{Ab}{Aa}$ (معامل الرص) نجد :

$$\frac{W_b}{W} = \frac{1}{\varepsilon} \qquad (5-50)$$

حيثε هو معامل الرص

وبالتعويض نجد:

$$h_L = \frac{W^2}{2g}(\frac{1}{\varepsilon} - 1) \qquad (5-51)$$

لو طبقنا معدلة بيرنوللي على نقطة من السطح الحر للخزان ونقطة من خط التيار بمحور الميزاب وباعتبار أن $W_0=0$ نجد:

$$\frac{P_0}{\gamma} + h = \frac{W^2}{2g\alpha_2} + \frac{P_0}{\gamma} + hL \qquad (5-52)$$

حيث α_2 هو معامل التصحيح لحد القدرة الحركية للجريان الحقيقي وسنعتبر الجريان مضطرباُ وبالتعويض نحصل :

$$h = \frac{W^2}{2g} + \frac{W^2}{2g}(\frac{1}{\varepsilon} - 1)^2$$

$$h = \frac{W^2}{2g} + \frac{W^2}{2g}(1 - \frac{2}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon^2})$$

$$h = \frac{W^2}{2g}(1 + 1 - \frac{2}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon^2})$$

ومنه يمكن أن نستنتج قيمة سرعة النافورة الخارجة من الميزاب :

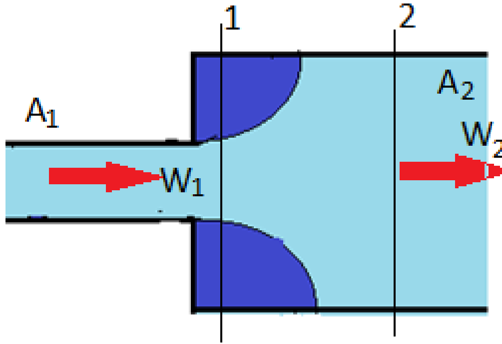
$$W = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\varepsilon^2 - 2\varepsilon + 1}}.\sqrt{2g.h} \qquad (5-53)$$

لقد وُجد تجريبياً أن قيمة ϵ في حالة الحواف الحادة للميزاب تساوي 0.62 .

5.4.2-الضياعات الموضعية أثناء التوسع المفاجئ:

إن توسع أنبوب الجريان بشكل مفاجئ من المساحة A_1 الى المساحة A_2 كما في الشكل (9 - 5) سيؤدي الى حدوث اضطرابات شديدة تؤدي الى ضياع موضعي في القدرة , علما أن الجريان يعود لينتظم بعد مسافة ما من مكان التغير.

ولحساب ضياع القدرة نستخدم قانون تبادل كمية الحركة للحجم من السائل المحصور بين المقطعين A_1 و A_2 المبين في الشكل (9 - 5)



الشكل (9- 5)

وذلك بإهمال الضياعات الخطية نجد

$$P_1 - P_2 = \rho W_2 (W_2 - W_1)$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{1}{g}(W_2^2 - W_1 . W_2)$$

وبالتالي ستظهر معادلة بيرنولي على شكل التالي :

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{1}{2g}(W_2^2 - W_1^2) + hL \qquad (5-54)$$

وبدمج العلاقتين السابقتين نجد :

$$hL = \frac{1}{2g}(W - W_2)^2 \qquad (5-55)$$

هذه المعادلة تدعى معادلة كارنو والتي تعطي الضياع الموضعي في حالة التوسع المفاجئ ، ولكن لدينا من معادلة الاستمرار:

$$A_1 W_1 = A_2 W_2$$

أو :

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

وبالتعويض نجد :

$$hL = \frac{W_2^2}{2g}(\frac{W_1}{W_2} - 1)^2 = \frac{W_2^2}{2g}(\frac{A_1}{A_2} - 1)^2 \qquad (5-56)$$

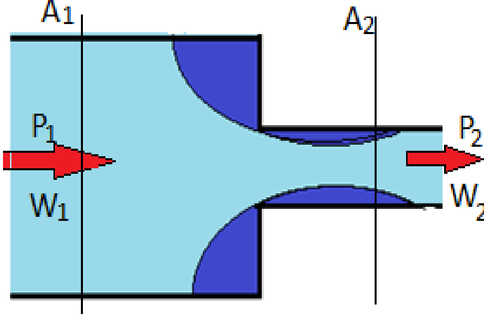
وبالمقارنة مع المعادلة العامة للضياعات الموضعية نلاحظ :

$$\zeta = \left(\frac{A1}{A2} - 1\right)^2 \qquad (5 - 57)$$

وعادة ما يعود الجريان للانتظام بعد مسافة تساوي تقريبا ($8d_2$) حيث d_2 هو قطر المقطع الأكبر.

5.4.3-الضياعات الموضعية أثناء التضييق المفاجئ:

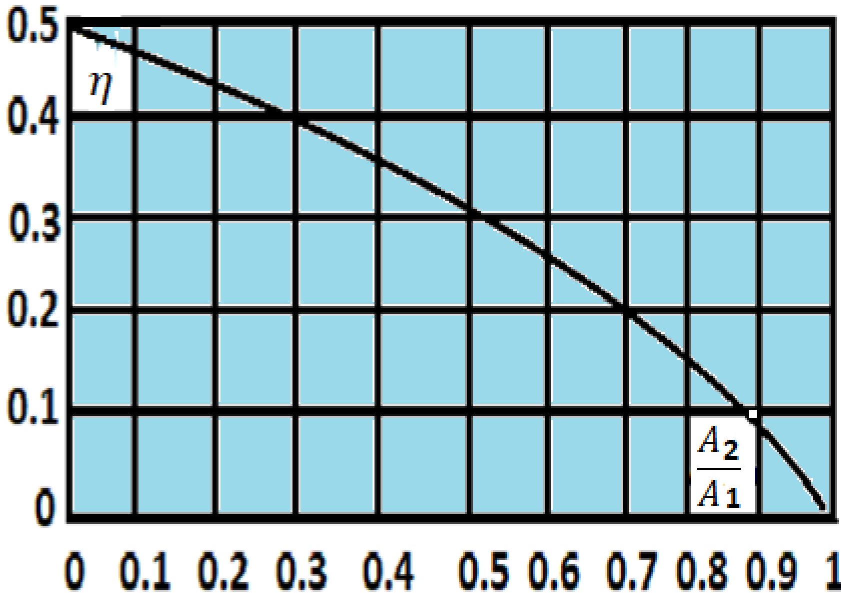
عادة ما يكون الضياع الموضعي في حالة التضييق المفاجئ كما في الشكل (5 -10) أقل مما هو عليه في حالة التوسع المفاجئ وبإتباع خطوات الطريقة السابقة يمكن أن نحصل على قيمة الضياعات الموضعية لتكون المعادلة على الشكل التالي:



الشكل (5 -10)

$$hL = \zeta\,\frac{W_2^2}{2g} = \eta\left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2 . \frac{W_2^2}{2g} \qquad (5 - 58)$$

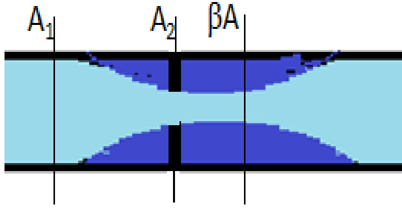
حيث η هو معامل له جداول خاصة أو وفق مخطط بياني تعطى قيمته حسب النسبة بين مساحتي المقطعين $\frac{A2}{A1}$ كما في الشكل (5 -11):



الشكل (5 -11)

5.4.4-الضياعات الموضعية في حالة الثقب الحاد:

في هذه الحالة يتشكل مقطع مرصوص في المنطقة التي تلي فوهة الثقب الحاد مباشرة مساحتها (β.A2) حيث A2 هي مساحة فوهة الثقب الحاد كما يبيّن الشكل (10- 5) , فإذا كانت W_b هي السرعة الوسطية في المقطع المرصوص



الشكل (12- 5)

فإن حمولة الاحتكاك الموضعي (الضياعات الموضعية) تحسب من العلاقة:

$$hL = \frac{(W_b - W_1)^2}{2g} = \frac{W_1^2}{2g}(\frac{A_1}{\beta A_2} - 1)^2 \qquad (5-59)$$

حيث :

W_1 هي السرعة الوسطية في الأنبوب

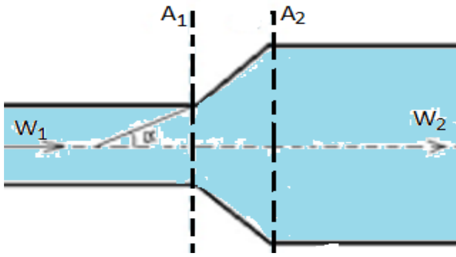
W_b هي السرعة في المقطع المرصوص

β عامل وتعطى قيمته تجريبيا وفق المعادلة

$$\beta = 0.63 + 0.37(\frac{A2}{A1})^3 \qquad (5-60)$$

5.4.5-الضياعات الموضعية أثناء التّوسّع التدريجي لمقطع الجريان:

عادة ما تكون الضياعات الموضعية أثناء الازدياد التدرجي لمقطع الجريان أقل مما هو الحال في حالة التغيرات المفاجئة ولكن لابد من وجود ضياعات سببها تباطؤ سرعة جزيئات السائل في منطقة التوسع مما يؤدي إلى اعاقة حركة السائل



الشكل(13 – 5)

في هذه المنطقة ، وكما هو معلوم فإن التزايد التدريجي بمساحة مقطع الأنبوب كما في الشكل (12- 5)سيكون على شكل مخروط ، و لزاوية انفراج المخروط أهمية بالغة حيث أن الزاوية الكبيرة للأنفراج تؤدي إلى انفصال السائل عن سطح جدار الأنبوب وقد وُجد أن الزاوية المُثلى للمخروط هي ($\alpha = 8^0$) والتي من أجلها يمكن تطبيق العلاقة التالية لتحديد الضياعات الموضيعة :

$$h_L = \zeta \frac{W^2}{2g}[(\frac{A2}{A1})^2 - 1] \qquad (5-61)$$

حيث: ζ هو عامل احتكاك موضعي تتراوح قيمته بين (0.15 – 0.2) .

ولقد لُوحظ أن الانفصال في الأقنية ذات المقطع المستطيل يتم عندما تكون زاوية الانفراج $\alpha=10^0$

وقد وُضعت بعض الجداول التي يمكن أن تُعطي قيمة معامل الضياعات الموضعية حسب نوع التفصيلات الشائعة في الحياة العملية كما يبيّن الجدول (2 – 5):

	نوع الاحتكاك	قيمة معامل الاحتكاك
1	كوع حسب قيمة الزاوية α	α: 90^o, 120^o, 125^o, 150^o ξ: 1.1, 0.55, 0.25, 0.2
2	R d انبوب منحني	$\xi = \left[0.13 + 0.16\left(\frac{d}{R}\right)^{3.5}\right]\frac{\alpha}{90}$
3	تدفق من انبوب	$\xi = 1$
4	تدفق الى انبوب حواف حادة	$\xi = 0.5$
5	تدفق الى انبوب حواف مقعرة	$\xi = 0.25$
6	حسب الفتحة α صمام في انبوب	α: 30°, 40, 45, 50, 60, 70 ξ: 5.47, 17.3, 31.2, 52.6, 206, 486
7	صمام عادي	$\xi = 3$
8	صمام سحاب (Gate)	$\xi = 0.15$

الجدول (2 – 5) قيمة معامل الضياعات الموضعية حسب التفصيل

5.5-تعميم الضياعات الموضعية:

مما سبق يمكن أن نلاحظ أن هناك علاقة عامة لحساب الضياعات الموضعية ويكون الفرق بين كل حالة و أخرى في طريقة حساب معامل الضياعات الموضعية ولتسهيل هذه العملية فقد وجد الباحثون جداول خاصة من أجل كل تفصيل من التفصيلات التي يمكن أن تصادف المهندس في حياته العملية كالتوسع المفاجئ أو التضيق أو الأكواع أو الصمامات وغيرها ومن هذه الجداول يمكن معرفة قيمة معامل الضياعات الموضعية و من ثم تعويضه في المعادلة العامة.

$$h_L = \zeta \frac{W^2}{2g} \qquad (5-62)$$

اضافة الى هذه الجداول فقد أوجد دارسي معادلة شبيهة تماما بمعادلته لحساب الضياعات الخطية والتي يمكن تطبيقها لحساب الضياعات الموضعية مع ادخال مفهوم الطول المكافئ أي :

$$h_L = \lambda \frac{Lekv}{d} \cdot \frac{W^2}{2g} \qquad (5-63)$$

و يُعرّف الطول المكافئ : بأنه الطول الذي تحدث فيه ضياعات بالاحتكاك تعادل الضياعات الموضعية التي يمكن أن تحصل نتيجة وجود تفصيلات خلال الجريان .

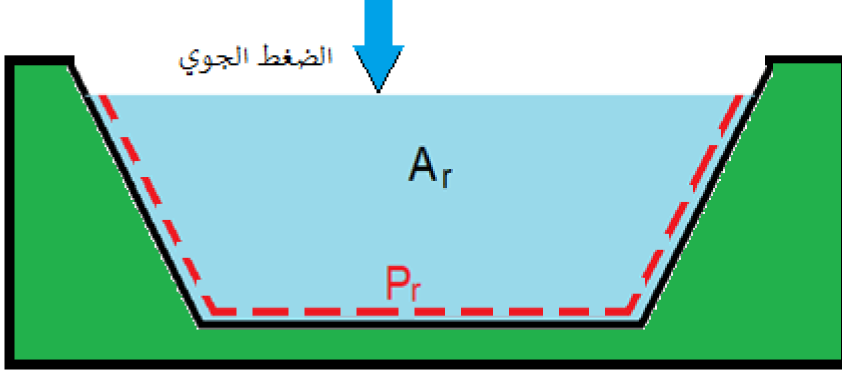
و تتوفر جداول خاصة تعطي بشكل سريع قيمة الحد $\frac{Lekv}{d}$ بما يتوافق مع نوع التفصيل و قطر الانبوب ،كما يبيّم الجدول (3 – 5) :

L_{ekv}/d	قطر الأنبوب مم (m.m)	أنواع التفاصيل
25-100		كوع 45^o
30/d	9.5-63.5	كوع 90^o
40	76.0-152.0	كوع 90^o
50	178.0-254.0	كوع 90^o
90	25-100	دخول إلى كوع T
60	25-100	دخول من كوع T
60		صمام Globe كروي
7	فتحة كاملة	صمام سحاب (gate)
40	3/4 فتحة	صمام سحاب (gate)
200	1/2 فتحة	صمام سحاب (gate)
11	-	صمام عادي أفقي
20	حواف حادة	صمام إلى أنبوب
200-300	-	مقياس درار
12		مقياس فيتوري

الجدول (3 – 5) قيمة الطول المكافيء حسب سبب الضياع

5.6- الجريان في الأقنية المكشوفة :

يمتاز الجريان في الاقنية المكشوفة الشكل (5 – 14) بأن الضغط على السطح الحر للسائل المتدفق هو الضغط الجوي ، ونظراً للتشابه بين الجريان في الاقنية المكشوفة مع الجريان في الانابيب لذلك نمتلك الامكانية في أن نطبق نفس القوانين العامة في الجريان في الانابيب على الجريان في الاقنية المكشوفة .



الشكل (5 – 14)

إن الجريان في الاقنية المكشوفة يمكن ان يكون صفحياً او مضطرباً ، حيث يكون الجريان صفحياً عندما يكون السائل على طبقة رقيقة في قعر القناة (غشاء رقيق) ، أما الجريان المضطرب فهو الجريان الأكثر شيوعاً والذي يحدث عندما يكون رقم رينولدز ضمن المجال (400-1100) حيث يُعطى رقم ينولدز وفق المعادلة المعروفة :

$$Re = \frac{w.\rho.d_m}{\mu} \qquad (5-64)$$

حيث :

d_m– هو متوسط القطر الهيدروليكي *والذي* نحسبه من العلاقة التالية :

$$d_m = 4 \times r_h \qquad (5-65)$$

حيث r_h - نصف القطر الهيدروليكي ويساوي :

$$r_h = \frac{A_r}{P_r} \frac{\text{سطح المقطع الحي}}{\text{محيط المقطع المبلل}}$$

وعادة ما نميز في الجريان المضطرب الأنواع الثلاثة التالية :

1- الجريان الهاديء Tranquil flow
2- الجريان السريع Rapid flow
3- الجريان الحرج Critical flow

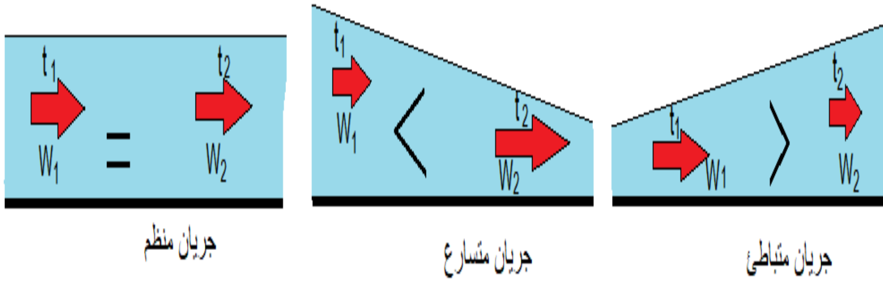
حيث تكون السرعة في الجريان الهاديء منخفضة بشكل لايؤدي الى حدوث إضطرابات (كأمواج الاضطراب) وهنا يتأثر الجريان بخطوط التيار العلوية والسفلية ،أما في الجريان السريع فتكون سرعة التدفق أكبر من سرعة الاضطراب وهنا لايتأثر الجريان بخطوط التيار السفلية ، بينما يحدث الجريان الحرج اذا تساوت سرعة الاضطراب (ارتفاع الموجة) مع سرعة التدفق .

ويمكن التمييز بين ثلاث أنواع من الجريان في الاقنية المكشوفة :

أ- الجريان المنتظم : ويكون فيه المقطع الحي للسائل ثابتاً على طول الجريان ويكون الميل ثابتاً وبالتالي فإن السرعة الوسطية للجريان ستكون ثابتة وعندها سيكون السطح الحر للسائل موازياً لقاع القناة .

ب- الجريان المتسارع : وفيه يتناقص المقطع الحي للسائل باتجاه الحركة (الجريان) مما يعني تزايداً للسرعة من مكان لآخر على طول القنة باتجاه الحركة .

ت- الجريان المتباطيء :حيث يزداد المقطع الحي للسائل باتجاه الحركة وتتناقص السرعة من مكان لآخر . كما يبيّن الشكل (15 – 5) :



الشكل (15 – 5)

وسوف نتابع لاحقاً دراسة الجريان المنتظم لأنه الجريان الأكثر شيوعاً في الأقنية المكشوفة ، حيث يمكن لهذا الجريان أن يكون صفحياً أو مضطرباً ، علماً أن الجريان المضطرب هو الأكثر مصادفةً في الحياة العملية ويكون رقم رينولدز أكبر بكثير من القيمة الحرجة التي تتراوح قيمتها من 500 الى 600 وهذه القيمة تتوافق مع قيمة رقم رينولدز في الأنابيب الدائرية المقطع 2300 بإعتبار أن قطر الأنبوب الدائري يساوي أربع أمثال نصف القطر الهيدروليكي $d_m=4r_h$ فإذا عوضنا r_h بدلاً من d_m نجد :

$$Re = \frac{2300}{4} = 575 \qquad (5-66)$$

إن الجريان في الأقنية المكشوفة يتم تحت تأثير تدارج الحمولة ، وفي حالة الجريان المنتظم فإن تدارج الحمولة يساوي تدارج القاع ويساوي تدارج السطح الحر للسائل

وسيكون ثابتاً أي :

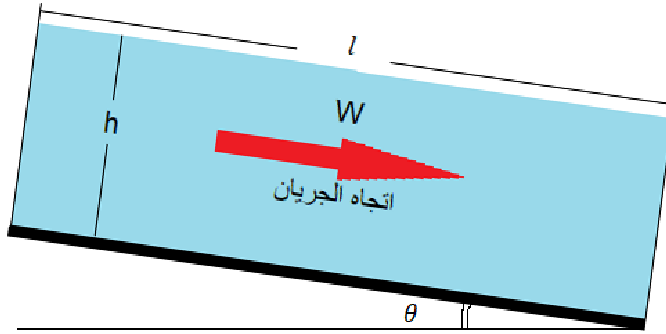
$$i = \frac{h}{l} \qquad (5-67)$$

حيث h- هو فرق الارتفاع بين نقطتين على السطح الحر للسائل تبعدان عن بعضهما مسافة l مقاسة على طول القناة .

وكما هو واضح أنه لا يوجد تدارج للضغط باتجاه الحركة عند الجريان في الأقنية المكشوفة ، والتدارج الوحيد هو تدارج مكاني فقط ، أي أن تدارج الحمولة في الأقنية المكشوفة ذات الجريان المنتظم هو تحويل القدرة الكامنة للمائع إلى قدرة حركية وذلك للتغلب على المقاومة الناتجة عن الاحتكاك الداخلي للسائل والاحتكاك مع الجدران ، وبالتالي فإن نظام الجريان في الاقنية المكشوفة يعتمد على القدرة التي يمتلكها السائل وعلة قيمة الاحتكاك .

5.6.1- الجريان المنتظم في الأقنية المكشوفة :

يكون الجريان منتظماً في الأقنية المكشوفة ذات المقطع والميل الثابتين كما في الشكل (5-16) إذا كان عمق السائل ثابتاً في أي نقطة من نقاط السطح الحر على طول القناة ،



الشكل (5 - 16)

فإذا كان الطول l فستكون قوة التسارع المتشكلة في السائل هي :

$$F_1 = A_r . l . \rho . g . \sin\theta \qquad (5-68)$$

وستكون قوة الإعاقة لحركة السائل (قوى الاحتكاك) هي :

$$F_2 = \tau . P_r . l \qquad (5-69)$$

حيث :

τ- هو اجهاد القص على السطح الصلب للقناة .

A_r–سطح المقطع الحي

l – طول القناة

P_r – المحيط المبلل

ومن أجل الجريان المنتظم فإن القوتين متساويتين أي :

$$A_r . l . \rho . \mathrm{g} . \sin\theta = \tau . P_r . l \qquad (5-70)$$

وبإصلاح العلاقة (5 – 70) نجد :

$$\tau = \frac{\mathrm{A_r}}{\mathrm{P_r}} . \rho . \mathrm{g} . \sin\theta \qquad (5-71)$$

$$\tau = \frac{\mathrm{d_m}}{4} . \rho . \mathrm{g} . \sin\theta \qquad (5-72)$$

وبتقسيم طرفي المعادلة (5 – 72) على ρW^2 حيث W هي السرعة الوسطية للجريان نجد :

$$\frac{\tau}{\rho W^2} = \frac{d_m . \rho g}{4\rho W^2} \sin\theta \qquad (5-73)$$

فإذا اعتبرنا أن $\psi = \frac{\tau}{\rho W^2}$ هو معامل الاحتكاك يمكننا حساب قيمة السرعة الوسطية أي :

$$W^2 = \frac{d_m}{4\psi} g \sin\theta \qquad (5-74)$$

ولكن $\sin\theta = \frac{h}{l}$ لذلك نستنتج :

$$W = \sqrt{d_m . i . \frac{2g}{8\psi}} \qquad (5-75)$$

ولابد من التذكير أنه في حالة الجريان المضطرب فإن عامل الاحتكاك ψ سيكون تابعاً للخشونة النسبية n لجدران القناة . و قد وُجد تجريبياً العلاقة بين معامل الاحتكاك والخشونة النسبية وفق المعادلة التالية :

$$\psi = \frac{1}{16}\left(\frac{\varepsilon}{d_m}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (5 - 76)$$

حيث ε : هي الخشونة المتوسطة

و نُبين في الجدول (4 – 5) قيم الخشونة المتوسطة للسطوح المصنّعة من بعض المواد الشائعة :

$\varepsilon(mm)$	المادة
0,046	خشب مستوي أو اسمنت مستوي
0,073	خشب خشن
0,113	اسمنت خشن
0,171	حديد صب
0,250	آجُرّ
0,518	فولاذ مبرشم
1,68	فلذّات قابلة للتآكل
3,65	مطّاط

الجدول (4 – 5) قيم الخشونة المتوسطة السطوح

و بتعويض قيمة معامل الاحتكاك بالمعادلة (5 – 74) سنجد :

$$W^2 = 4.\, d_m^{\frac{4}{3}}.\, \varepsilon^{-\frac{1}{3}}.\, g \sin\theta \qquad (5 - 77)$$

ولتحديد كمية السائل المتدفق Q نعود الى علاقة الاستمرار المعروفة :

$$Q = W.A$$

لنجد قيمة التدفق :

$$Q = 2.\, A.\, d_m^{\frac{2}{3}}.\, \varepsilon^{-\frac{1}{6}}.\, \sqrt{g \sin\theta} \qquad (5 - 78)$$

نظراً لعدم وجود تحوّل في اشكال القدرة فإن ضياع القدرة بالاحتكاك من اجل واحدة الكُتل للسائل المتدفق ضمن الشروط الآيزوثيرميّة خلال طول l سيكون مساوياً لضياع القدرة الكامنة للسائل أي :

$$h_f = i.l = \psi.\frac{W^2}{2g}.\frac{l}{r_h} \qquad (5-79)$$

$$\frac{h_f}{l} = i = \psi.\frac{W^2}{2g}.\frac{1}{(\frac{d_m}{4})} \qquad (5-80)$$

كما وتوجد علاقات تجريبيّة لتحديد السرعة في الاقنية المكشوفة منها مثلاً :

- علاقة شيزي :

$$W = \sqrt{\frac{2g}{\psi}.i.r_h} \qquad (5-81)$$

ويمكن أن تظهر هذه المعادلة بشكل آخر :

$$W = C\sqrt{\frac{d_m.\sin\theta}{4}} \qquad (5-82)$$

حيث تتعلق قيمة الثابت C بواحدات الجملة المستخدمة وبالكميات المذكورة في العلاقة السابقة وتتراوح قيمته بين $[\,35\ m^{\frac{1}{2}}/_{S}$ و $140\ m^{\frac{1}{2}}/_{S}\,]$ وذلك تبعاً لشكل جدران القناة و خشونتها .

- علاقة بازين :

$$W = 0{,}0026\left(1+\sqrt{\frac{\varepsilon}{r_h}}\right)^2 \qquad (5-83)$$

وهي تستخدم في الاقنية التي يتراوح عمقها بين *0,5 m* و *3 m* حيث يتعلق معامل الجريان ψ بالخشونة فقط .

- علاقة مانّينغ :

$$W = \frac{1}{n}.r_h^{\frac{2}{3}}.i^{\frac{1}{2}} \qquad (5-84)$$

وهي العلاقة التجريبية الأكثر تطبيقاً واستخداماً .

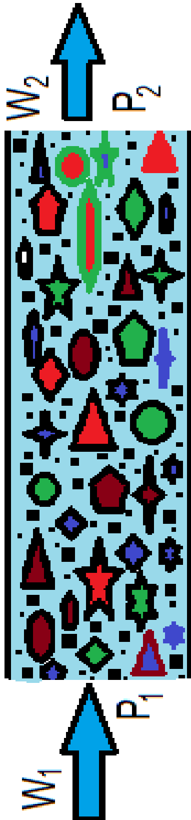
5.7- الجريان في الأنابيب ذات الأسرّة (المحشيّة):

يُعتبر الجريان في الأنابيب الحاوية على جسيمات صلبة أو حبيبات من الحالات الخاصة في الجريان وله أهمية بالغة في مجال الهندسة الصناعية حيث يمكن أن تكون هذه الجسيمات ضرورية لإجراء تفاعل كيميائي ما أو ربما تكون صفائح للتحكم بسير العملية الكيميائية أو غيرها من الحالات .يصعُب في مثل هذه الحالات تحديد أبعاد التيار للتدفق ،حيث يعتبر التدفق نسبياً فقط بالنظر الى الأجسام التي يجري من خلالها التدفق وبالتالي سوف يتركّز بحثنا في حركة السوائل عبر طبقات المواد الحبيبيّة والحركة عبر طبقات الجسيمات الصلبة ذات الأبعاد الكبيرة .

ويمكن أن نستفيد من هذه الدراسة في تقديم معايير مهمة تُساعد في اقتراح وتصميم عمليات عديدة في الحقل الصناعي .

5.7.1- الجريان وحيد الطور عبر طبقات من جسيمات مادة صلبة :

لهذا النوع من الجريان أهمية بالغة نظراً لتكرار تواجده في أغلب العمليات التكنولوجية كالامتصاص والامتزاز وعمليات تبادل الشوارد والترشيح وفي المفاعلات



الوسيطيّة ومن خلال طبقات الوسيط الثابتة و غيرها الكثير كما في الشكل (14 – 5) لذلك فإن تصميم الأجهزة والمفاعلات بالمواصفات المطلوبة يعتمد بشكل رئيسي على خصائص الجريان التي بدورها تتأثر بمواصفات السائل ومواصفات الطبقة ونوع الجسيمات . حيث يمكن أن تكون هذه الجسيمات كروية او اسطوانية أو تمتلك أي شكل هندسي آخر ، كما يمكن أن تكون طبيعية المنشأ كالرمل والفحم والغرانيت الطبيعي وغيرها بحيث أنها لا تمتلك شكلاً هندسياً واحداً ، بل وليس لها أبعاد هندسية واحدة ، عادة ما تُظهر الجسيمات ذات الشكل الهندسي المنتظم فيما بينها فراغات منتظمة إلى حدٍ ما وتكون بنية الطبقات متجانسة تقريباً على عكس الطبقات الناتجة عن الجسيمات اللا منتظمة حيث تعطي فراغات غير متجانسة مما يؤدي الى توزع غير منتظم للكثافة وهذا ما يؤدي الى صعوبة بالغة في تحديد معايير التدفق أهم ما يجب معرفته في مثل هذه الأنواع من الجريان هو انخفاض الضغط عبر

الشكل (17 – 5)

طبقات الجسيمات الصلبة ، وقد وُضعت العديد من العلاقات لتحديد انخفاض الضغط الذي يمثل الضياع في الطاقة ، إلّا اننا سنكتفي بالعلاقة التي وضعها العالمان روزيني وكارمان (Rozeny-Karman) :

$$\left(\frac{-\Delta P}{\gamma}\right) = \lambda_v . \frac{L}{d_e} . \frac{W^2}{2g} . \frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} . \left(\frac{1}{\emptyset}\right)^{3-n} \qquad (5-85)$$

حيث :

$(-\Delta P)$ - ضياع الضغط في الطبقة.
γ - الوزن النوعي للسائل .
λ_v - عامل المقاومة (الاحتكاك).
L - ارتفاع الطبقة .
d_e - القطر المكافيء للجسيمة.
$\emptyset$ - معامل الشكل وهو قيمة لابعدية .

W – سرعة تدفق السائل خارج الطبقة وتُعرف كنسبة التدفق الحجمي للسائل على سطح مقطع الانبوب فارغاً
ε - كمية لابعدية تسمّى الحجم النوعي للفراغات .
n – أسٌّ يتعلق بقيمة رقم رينولدز.

يُعرف القطر المكافئ d_e للجسيمة بأنه قطر كرة يساوي حجمها حجم الجسيمة ،فمن أجل الجسيمات الكروية فإن القطر المكافئ يساوي قطر الجسيمة ،كما نعرّف الحجم النوعي للفراغات ε بأنه نسبة حجم الفراغات في الطبقة الى حجم الطبقة الكلية وبالتالو معامل يميز حجم الجسيمات ويمكن استنتاجه من العلاقة :

$$\varepsilon = \frac{L.A - L_o.A}{LA} = 1 - \frac{L_o}{L} \qquad (5-86)$$

حيث :

A – سطح مقطع الوعاء الذي تتوضع فيه الطبقة .

L_o – ارتفاع الطبقة المرصوصة ،التي لاتحتوي على فراغات .

إن الحجم النوعي للفراغات يؤثر بشكل واضح على قيمة ضياع الضغط،لذلك لابد من تحديد هذه القيمة بدقة في كل الحسابات التقنية ويتعلق الحجم النوعي للفراغات في الجسيمات المنتظمة بأبعاد وشكل هذه الجسيمات وبنسبة قطر الجسيمات الى قطر العمود حيث تتوضع الطبقة ، وكذلك يعتمد وجود الفجوات الفارغة في طبقات الجسيمات على طريقة تشكيل هذه الطبقات في الجهاز .حيث تختلف قيمة ε تبعا لسرعة او بطء ودقة عملية سكب هذه الجسيمات .

تُظهر الجسيمات غير المنتظمة ارتفاعاً في الحجم النوعي للفراغات ، ويمكن القول بأن الحجم النوعي للفراغات (كثافة الفراغات) فيالطبقة يتعلق بتشابه الجسيمات فيما

بينها . فمزيج جسيمات مختلفة الأبعاد يعطي انخفاضاً في ε أكبر من قيمته في مزيج لجسيمات كبيرة الأبعاد . وتتراوح قيمة ε

مابين (*0,35 -0,50*)وتحدد هذه القيمة تجريبياً وفي شروط تساعد على إعادة تطابق النتائج . أما معامل الشكل Ø فهو النسبة بين سطح الكرة الى سطح الجسيمة بحيث يكون حجم الكرة مساوياً لحجم الجسيمة ،و يظهر تأثير معامل الشكل Ø على انخفاض الضغط بشكل مباشر أو غير مباشر ، فالتأثير غير المباشر ينتج عن علاقة المعامل ε بشكل الجسيمة ، أما التأثير المباشر فينتج عن علاقة شكل الفراغات بشكل الجسيمة وبالتالي تأثير قوى المقاومة ، ويمكن تحديد قيمة معامل الشكلØ للجسيمات المتناظرة بسهولة أما للجسيمات الغير متناظرة فيتم تحديده تجريبياً ، وتتراوح قيمة معامل الشكلØ مابين (*0,5 -1*) .

في الحالة التي تكون فيها طبقة الجسيمات مشكلة من جسيمات مختلفة الأبعاد بحيث لا تتعدى أبعاد الحبيبات الكبيرة ضعف قيمة أبعاد الحبيبات الصغيرة ، يجب أن نُصلح علاقة حساب انخفاض الضغط ،بحيث نعبّر عن قيمة الكمية d_e بالمعادلة التالية :

$$d_e = \sum_{i=1}^{i=m} X_i \, . \, d_{ei} \qquad (5-87)$$

وفي الحالة التي يكون فيها خليط الجسيمات مختلفاً بشكل كبير فإن قيمة d_e تُعطى بالعلاقة :

$$d_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=m} X_i / d_{ei}} \qquad (5-88)$$

حيث :

X_i – الكسر الوزني لمجموعة الجسيمات ذات بُعد وسطي محدد .

M – عدد المجموعات .

d_{ei} – القطر المكافئ للجسيمة في المجموعات .

أما في الحالة التي تكون فيه الجسيمات ناعمة (مناخل) فإن d_{ei} تُحسب من العلاقة

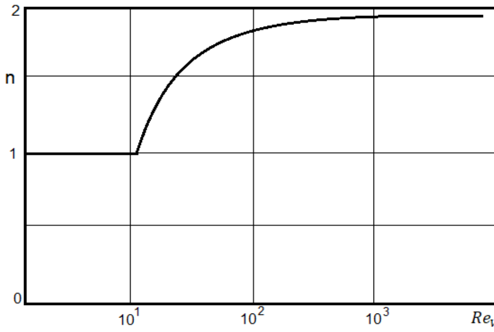
$$d_{ei} = (d_1 - d_2)^{0.5} \qquad (5-89)$$

حيث : d_1 وd_2 هي أقطار الثقوب الشبكات المتتالية التي تُحدد المجموعة .

أما الأُس n بعلاقة انخفاض الضغط فهو يتعلق برقم رينولدز الذي يميز الجريان :

$$Re_V = \frac{d_e.W.\rho}{\mu}$$

فعندما يكون $Re_V < 10$ يكون الجريان صفحياً وتكون n=1 أما عندما يكون $Re_V > 100$ نعتبر الجريان مضطرباًوتكون n=2



الشكل (18 – 5)

ويوضّح الشكل (18 – 5) العلاقة بين Re_V و n . وفي اغلب الحالات يكون الجريان مضطرباً أما عندما يكون رقم رينولدز بين 10 و 100 فإننا سوف نستخدم الجدول:

90	70	50	30	10	Re_V
1,7	1,6	1,5	1,2	1	n

وكذلك الأمر فإن معامل الاحتكاك λ_v يتبع رقم رينولدز ، فإذا كان الجريان صفحياً فإن λ_vتساوي :

$$\lambda_v = \frac{400}{Re_v} \qquad (5 - 90)$$

وبالتعويض بعلاقة انخفاض الضغط نجد :

$$(-\Delta P) = 200.\frac{\mu LW}{d_e^2}.\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}.\left(\frac{1}{\emptyset}\right)^2 \qquad (5 - 91)$$

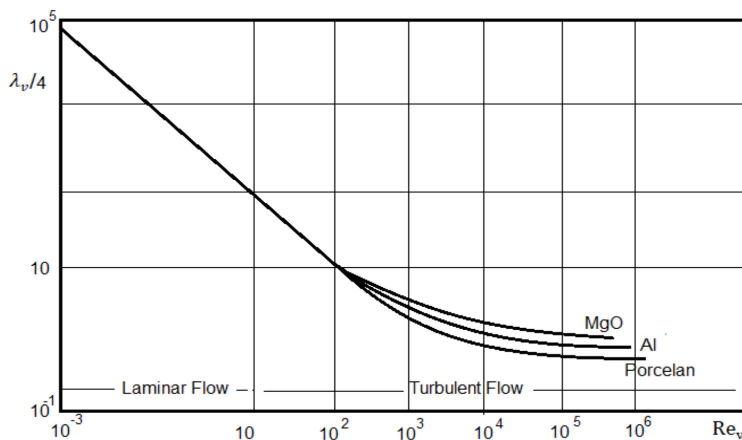
أما إذا كان الجريان مضطرباً فإن معامل مقاومة الطبقة λ_v يُعطى بالعلاقة :

$$\lambda_v = \frac{K}{Re_v^{0,1}} \qquad (5 - 92)$$

حيث K ثابت تتعلق قيمته بخشونة سطح الجسيمة .

إن قيمة الثابت K تختلف حسب خشونة سطح الجسيمات فمثلاً للجسيمات الناعمة الزجاجية او المصنوعة من البورسلان K=14 وتزداد قيمته مع ازدياد الخشونة لتصبح مثلاً للأسمنت والآجّر يساوي 21 *وتصل للقيمة* 32 من أجل الجسيمات المصنّعة من أكسيد المغنيزيوم MgO .

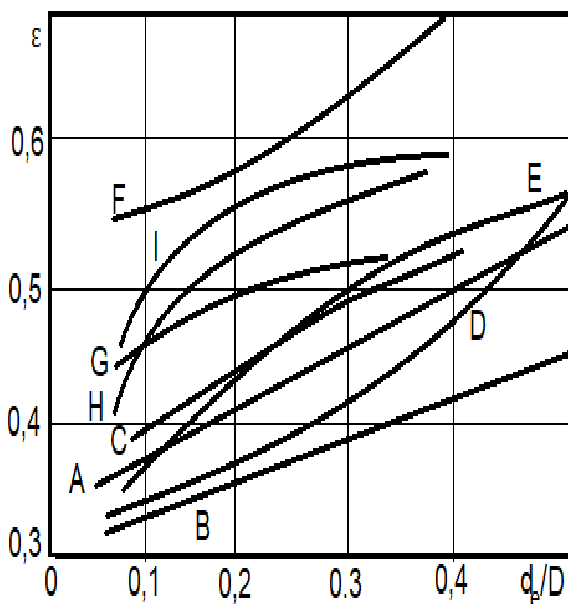
وسنوضّح بالشكل (19 – 5) علاقة معامل المقاومة الاحتكاك λ_v برقم رينولدز لطبقات الجسيمات من أجل عدد من السطوح :



الشكل(19 – 5)

ونبيّن في الجدول التالي والشكل المُرفق علاقة الحجم النوعي للفراغات في الطبقة مع النسبة ما بين قطر الجسيمة d_e الى قطر العمود D وذلك لأنواع مختلفة من الجسيمات :

A. جسيمات ناعمة السطح متساوية الأقطار
B. جسيمات ناعمة السطح غير متساوية الأقطار
C. سيراميك
D. جسيمات ناعمة السطح متساوية الابعاد
E. جسيمات متساوية الابعاد من أكسيد الالمنيوم
F. حلقات راشينغ
G. جسيمات من أكسيد المغنيزيوم
H. سيراميك +أكسيد الالمنيوم
I. كروند



الشكل(20 – 5)

5.7.2- الجريان ثنائي الطور عبر حشوة العمود :

يُصادف هذا النوع من الجريان أثناء تدفق الغاز والسائل أو أثناء جريان سائلين غير ممتزجين عبر طبقات الجسيمات الصلبة في أجهزة العمليات كالتقطير والامتصاص

والاستخلاص وغيرها ،وغالباً ما يتم تصميم هذه الأجهزة على شكل أعمدة اسطوانية شاقولية التّوضع (أبراج)،حيث تشكل فيها طبقة الجسيمات المادة المالئة (الحشوة) وبذلك يزداد سطح التماس بين الأطوار المتدفقة عبرها ، ويساعد التوضع الشاقولي للأبراج على تأمين شروط اضطراب شديدة للجريان مما يُحسّن مردود العملية التي تجري في هذه التجهيزات .

إن دراسة الجريان ثنائي الطور أكثر تعقيداً من دراسة الجريان أحادي الطور ،فبالإضافة الى تأثير المادة الصلبة وخصائص كل طور من الأطوار المتدفقة ،يظهر أيضاً التأثير المتبادل للقوى بين الطورين حيث تتسبب محصلة هذا التأثير في بعض الأحيان الى نشوء جرياناً غير منتظم يمكن أن يؤدي الى فصل الطور المستمر في الجريان الى طور متشتت أو العكس .إن هذه الحالة غير المنتظمة للجريان في الأبراج تّدعى (Flooding) إغراق البرج . كما أن التدفق المحوري المستمر يمكن أن يُسبب تغيراً في الخصائص النوعية للمواد المالئة و لخصائص طبقات الحشوة أيضاً .

5.7.2.1- خصائص حشوة العمود :

تتألف طبقات المواد المالئة في أعمدة التجهيزات من جسيمات ذات أبعاد كبيرة بالنسبة إلى أبعاد الجسيمات التي سبق ذكرها ، ويمكن تقسيم هذه المواد إلى قسمين أساسيين : حشوات منظّمة وحشوات غير منظّمة ، يتبع القسم الأول جميع الحشوات المتوضعة بانتظام في الأبراج والتي لا تُشكّل طبقات من الجسيمات والحشوات الفلزيّة المختلفة الأبعاد والمقاطع ، بينما يتبع القسم الثاني جميع الحشوات المُشكّلة بواسطة السكب للجسيمات في مواضعها من العمود .

تتصف الحشوات المنظّمة بفراغات كبيرة ومقاومة أقل لتدفق الأطوار وعادةً ما تُستخدم في حالات التدفق الغازي وتعتبر ذات مردود منخفض من حيث تنشيط العمليات ،لذلك تتجه الأنظار في الصناعة إلى استخدام الحشوات غير المنظّمة والمنخفضة الثمن ، حيث أُستخدمت منذ القِدم على شكل طبقات مؤلفة من الكوك أو نشارة الخشب أو غيرها من المواد . وتتميز هذه المواد بثمنها الزهيد ولكنها لا تحقق الشروط التكنولوجية المطلوبة .لذلك يُلاحظ أن جميع المواد المالئة أصبحت صناعية المنشأ كالسيراميك أو الفلزات والتي تصمم بأشكال مختلفة كحلقات راشيغ و

حلقات ليسنغ وحلقات بال وحلقات بيرل وحلقات كانّون ، ونبين في الشكل

(21 – 5) بعض النماذج من هذه الحلقات :





الشكل(21 – 5)

ونبيّن في الجدول التالي خصائص بعض أنواع الجسيمات المصنّعة من مواد مختلفة

ε %	سطح التماس m^2/m^3	الوزن النوعي Kp/m^3	عدد الجسيمات في كل $1\ m^3$	السماكة mm	القياس mm	مادة الحشوة
70	69	720	742	11,8	100	**حلقاتLessing من السيراميك**
69	112	689	5 650	6.1	50,8	
68	223	785	45 903	3,3	25,4	
72	279	736	100 633	2,28	19,1	
64	426	833	363 693	1,77	12,7	
69	574	753	829 785	1,27	9,52	
65	964	785	3 142 590	0,76	6,35	
63	1276	897	7 344 480	0,64	4,76	
95	85	400	1 765	1,22	76,2	**حلقاتLessing من الفولاذ**
93	125	577	5 650	1,22	54,8	

	25,4	0,71	47 668	689	262	91
	19,1	0,56	100 633	657	312	92
	12,7	0,45	370 755	881	518	89
	9,52	0,38	706 200	737	557	90
	6,35	0,38	2 401 080	1121	862	85
	3,18	0,31	14 124 000	1409	1325	82
حلقاتRaschig من البورسلان	100	11,8	812	593	52	74
	50,8	6,35	6 000	625	95	73
	25,4	3,56	47 665	689	190	71
	19,1	2,28	105 930	625	239	77
	12,7	1,77	370 755	673	367	71
	9,52	1,27	918 060	833	515	73
	6,35	0,76	3 177 900	641	794	72
	3,16	0,51	20 479 800	873	1263	72
حلقاتRaschig من الفولاذ	76,2	1,63	1 900	448	72	94
	54,8	1,22	6 000	464	102	94
	25,4	0,71	49 430	561	207	93
	19,1	0,56	116 520	576	276	93
	12,7	0,46	391 940	705	417	91
حلقاتRaschig من الألمنيوم	76,2	7,93	1 720	368	62	78
	50,8	6,35	5 860	432	95	74
	25,4	3,18	46 780	432	187	74
	19,1	3.18	110 870	546	246	67
	12,7	1,6	374 290	432	374	74
	6,35	1,6	3 001 000	737	695	55
Berl Saddle سروج بيرل	50,8	-	9 534	640	115	77
	25,4	-	79 450	721	243	70
	19,1	-	169 490	769	312	69
	12,7	-	564 960	881	466	66
	9,52	-	1 412 400	881	620	65
	6,3	-	5 119 900	897	1148	65

كما تتأثر خصائص الجريان الثنائي الطور بنوع السرير الذي تتوضّع فيه المواد المالئة وبحواجز التوزيع التي توجه جريان السائل في الحشوة ،وعادةً ما تُصنع هذه الأسرّة من

الصفائح الفولاذية أو البورسلانية بحيث تحقق مساحة الثقوب نصف مساحة مقطع العمود وتكون الثقوب صغيرة بحيث لا تُغلقها الجسيمات أو تشكّل زيادة في مقاومة الجريان .و لابد من وضع حواجز للتوزيع بين طبقات الحشوة التي تتراوح أبعادها من 6 – 1,5 m بهدف توجيه تيار السائل في الحشوة لكي يتم الجريان من خلال السطح الكلي لمقطع طبقة الحشوة و لمنع التدفق المباشر للسائل من مناطق محدودة أو بالقرب من الجدران حيث الحجم النوعي للفراغات مرتفع وبالتالي فإن هذه الحواجز تعمل على زيادة شدّة العمليات التي تجري في الطبقة المالئة للأبراج و تعتبر ذات أهمية بالغة في دراسة نظام الجريان واقتراح الحلول الملائمة لهذه العمليات .

ولابد من التنويه إلى أنه لا تتوفر مبادئ واضحة ودقيقة لتحديد انخفاض الضغط ومن غير الممكن استخدام علاقة حساب انخفاض الضغط التي طبقناها في النظام أحادي الطّور ، وقد وُضعت بعض العلاقات التجريبيّة لتحديد ضياع الضغط عند جريان الغاز عبر حشوة صلبة وباتجاه معاكس للسائل ومن أهم هذه العلاقات كانت العلاقة التالية

$$(-\Delta P) = a.10^{b\dot{L}}.\frac{\dot{G}^2}{\rho} \qquad (5 - 93)$$

حيث :

$(-\Delta P)$ انخفاض الضغط لوحدة طول الحشوة و يُعبر عنها بالجملة التقنيّة بواحدة Kp/m^2

$-\dot{L}$ التدفق الكتلي للسائل و يعبر عنها بواحدة Kg/m^2s

$-\dot{G}$ التدفق الكتلي للغاز ويعبر عنها بواحدة Kg/m^2s

ρ – كثافة الغاز ويعبر عنها بواحدة gr/Cm^3

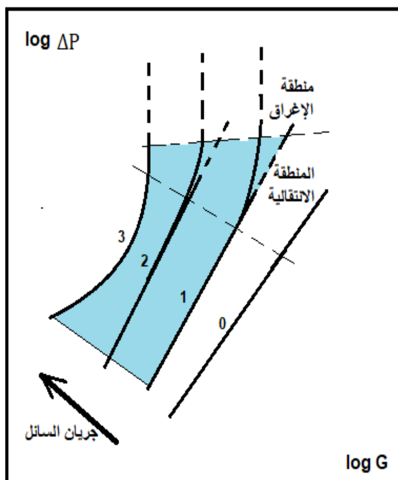
a و b - ثوابت تتعلق بنوع الجسيمات وتُأخذ من الجدول (6 – 5) :

مادة الحشوة	القياس mm	a	b	% , ε
حلقات راشيغ	9,52	26,33	0,084	57
	12,7	17,37	0,084	59
	15,8	12,89	0,053	67
	19,0	07,84	0,053	72
	25,0	05,38	0,051	69
	31,8	03,19	0,047	76
	38,1	02,18	0,047	76
	50,8	01,32	0,034	82

سروج بيرل	12,7	6,60	0,043	63
	19,0	3,41	0,034	71
	25,4	2,18	0,034	71
	38,1	1,17	0,026	70
سروج انتالوكس	12,7	4,59	0,041	77
	19,0	2,63	0,033	75
	25,4	1,74	0,029	74
	38,1	0,78	0,029	78
	50,8	0,45	0,029	80

و بغض النظر عن نوع الحشوة غير النظامية فقد لُوحظ أنه بإنخفاض الضغط الى قيمة تعادل $250\ Kp/m^2$ للمتر الواحد من الحشوة سيؤدي الى انقطاع الاستمرارية في تدفق الأطوار وتحدث حالة الإغراق للعمود ، حيث يُغرق السائل الفراغات بين الجسيمات في العمود (البرج) أو في جزء منه ما يؤدي الى انخفاض شديد في الضغط في الطبقة و عندها يبدأ الغاز بحمل السائل الى خارج العمود.

يمكن ببساطة الكشف عن حالة الإغراق في البرج (الطفح) وذلك من متابعة علاقة ضياع الضغط بدلالة كمية التدفق للغاز عند تدفقات مختلفة للطور السائل ، ويبين الشكل(22 – 5) مخطط هذه العلاقة حيث يمثل المحور الأفقي في المخطط لوغاريثم تدفق الطور الغازي ويمثّل المحور الشاقولي قيمة لوغاريثم ضياع الضغط ،أما المقادير المتغيرة الممثلة بالخطوط فهي تمثل تدفقات الطور السائل حيث يمثّل الخط 0 عندما لا يوجد تدفق للسائل والخط 1 يمثّل زيادة محددة بتدفق السائل وكذلك الخطوط 2 و 3 ، ونلاحظ من المخطط أنه من أجل تدفق معين للغاز يزداد ضياع الضغط بازدياد تدفق السائل وأن زيادة تدفق الغاز يؤدي فجأة الى زيادة في ضياع الضغط ويمثّل الانكسار في خطوط التدفق حالة الإغراق للعمود . إن المنطقة المحددة بين منطقة الجريان المستقر و منطقة الإغراق توافق حالة ازدياد في تأجيل تدفق السائل في العمود ، إن ازدياد تأجيل (استبقاء) السائل يظهر عند القيمة 2 و يتبع فقط التدفق الغازي، وبالتالي فإن زيادة استبقاء السائل في العمود تزداد بزيادة تدفق الغاز الى أن يحدث الإغراق في العمود



الشكل(22 – 5)

حيث يُصبح استبقاء السائل كبيرا وتمتلئ جميع الفراغات بين الجسيمات بالسائل و تُصبح كمية السائل الموجودة في وحدة الحجم للعمود متغيرة تبعاً لتدفق الغاز ، بينما تكون هذه الكمية ثابتة في الجريان إن المردود الفعلي لحشوة العمود يتطلب اختيار شروط العمل الملائمة حيث يكون جريان الأطوار مستقراً تماماً و بالتالي يكون الاستبقاء ثابتا ، لذلك حاول الباحثوناستنتاج علاقات تُحدد سرعة الغاز المحددة لحدوث اغراق العمود وقد توصل العلماء الى العلاقة التجريبية التي تظهر بالشكل (5 – 21) :

حيث

W_0	سرعة الغاز التي يحدث عندها الإغراق.
ρ_L	كثافة السائل.
ρ_G	كثافة الغاز.
μ_L	لزوجة السائل.
μ_W	لزوجة الماء في درجة حرارة العملية.
ε	الحجم النوعي للفراغات .
a	السطح النوعي للحشوة (سطح الجسيمات المشكلة لوحدة حجم الطبقة).
G	التدفق الكتلي للغاز .
L	التدفق الكتلي للسائل .
g	تسارع الجاذبية .



الشكل(23 – 5)

تُعطى جميع الكميات الفيزيائية السابقة بالوحدات الأساسية و تؤخذ خصائص المادة المالئة من الجدول الذي عرضناه سابقاُ .

أما في حالة الحشوة المنتظمة فإن حالة الإغراق تحدث عند انخفاض الضغط لحوالي 60 Kp/m^2 للمتر الواحد من ارتفاع الحشوة في العمود، ولكن هذا الإغراق لا يُظهر انكساراً في منحني العلاقة السابقة لانخفاض الضغط و انما انحناءة بسيطة فقط .

5.7.3- جريان سائلين غير ممتزجين عبر طبقة من الجسيمات :

يحدث هذا النوع من الجريان لسائلين غير قابلين للامتزاج ضمن طبقة الجسيمات ، بحيث يشكل احد الطورين أثناء الجريان في العمود الطور المستمر الذي يُشتت فيه الطور السائل الآخر بشكل أجزاء (حبيبات) صغيرة . وقد أظهرت الدراسات لهذا النوع من الجريان أنه من أجل سرعة تدفق محددة للطور المستمر يزداد استبقاء الطور

المُتشتت -بدلالة علاقة تدفقة – الى قيمة محددة يحدث عندها الإغراق بالطور المتشتت، وتدعى هذه الحالة بانقلاب الطور.

وتعتبر علاقة ديل-بريت العلاقة الأكثر أهمية وشهرة التي تستخدم لتحديد شروط إغراق العمود :

$$\left[1 + 0{,}835\left(\frac{\rho_d}{\rho_c}\right)^{0{,}25}\left(\frac{W_d}{W_c}\right)^{0{,}5}\right] = C\left[\left(\frac{aW_c^2}{g\varepsilon^3}\right)\left(\frac{\rho_c}{\Delta\rho}\right)\left(\frac{\delta}{\delta_V}\right)^{0{,}25}\right]^{0{,}25} \qquad (5-94)$$

حيث :

- d- دليل يرمز للطور المُتشتت .
- c- دليل يرمز للطور المستمر .
- W_c ,W_d- تمثل السرع في المقطع الفارغ من عمود البرج .
- a- سطح الجسيمات الموافق لوحدة الحجم من الحشوة .
- $-\Delta\rho$ الاختلاف بين كثافة الطورين .
- δ- التوتر السطحي بين الطورين
- $-\delta_V$ التوتر السطحي بين الماء والهواء في درجة الحرارة $20\ C^o$.
- C- ثابت تختلف قيمته حسب نوع الحشوة و يُؤخذ من الجدول التالي :

C	القياس mm	مادة الحشوة
0,68	12,7	حلقات راشيغ
0,77	12,7-19,1	حلقات راشيغ
0,82	25,4	حلقات راشيغ
0,80	9,5-12,7	حلقات ليسينغ
0,80	12,7	كرات
0,88	12,7-25,4	سروج بيرل
0,68	6,4	سروج بيرل

الفصل السادس

المضخّات

مقدّمة :

المضخّات هي آلات تعمل على تحويل الطاقة الميكانيكية الى طاقة كامنة حيث تأخذ المضخة الطاقة الميكانيكية من محرك خارجي (كهربائي أو ديزل أو بخاري ....) مربوط معها .

لابد من الإشارة إلى أن القدرة المطلوبة من المضخّة تتعلق بعدة متغيرات :

1- الحمولات (الارتفاعات) الهندسية الواجب نقل السائل إليها .
2- الضغط المطلوب توفره للسائل عند وصوله لنقطة النهاية .
3- طول الأنابيب الناقلة للسائل وأقطارها.
4- خصائص السائل المطلوب نقله .

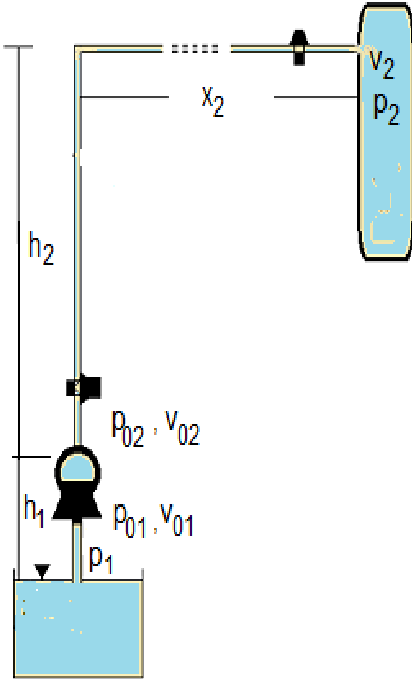
6.1- مبدأ عمل المضخة :

يبيّن الشكل جانباً مجموعة ضخ يظهر فيه من الأسفل إلى الأعلى الأقسام التالية :

1- خزان تجمّع السائل (البئر مثلاً) .
2- الأنبوب الواصل بين خزان التجميع والمضخّة
3- المضخّة .
4- الأنبوب الواصل بين المضخّة والمكان المطلوب نقل السائل إليه .

إنّ الأنبوب الواصل بين خزان التجميع والمضخّة يُدعى أنبوب السحب بينما يُدعى الأنبوب الواصل بين المضخّة ومكان الوصول بأنبوب الطرح.

ومن الشكل يتضح أنه يتوجب على المضخّة سحب السائل من مكان تجمعه إلى المضخّة ذاتها ومن ثم تأمين رفعه للارتفاع المطلوب و طرحه الى المكان المخصّص لنقل السائل إليه وبحيث



الشكل (1 – 6) مجموعة ضخ تمثيلية

يمتلك السائل المطروح تدفقاً وضغطاً محددين .لذلك ولكي تقوم المضخّة بهذه المهام يجب أن يتشكل داخل المضخّة ضغطاً تخلخلياً (فراغياً) يعمل على سحب السائل من مكان تجمعه إلى المضخّة من خلال أنبوب السحب .فإذا كان الضغط المطبق على السطح الحر للسائل في مكان التجميع هو P_1 فيجب أن يتوفر في المضخّة ضغطاّ أقل من هذا الضغط ولنرمز له بالرمز P_{01} ليتشكل فرقاً في الضغط قادراً على حمل هذه الكمية من السائل إلى المضخّة ، فإذا افترضنا أن سرعة انخفاض السائل على السطح الحر في مكان التجميع هي V_1 وسرعة دخول السائل إلى المضخّة هي V_{01}وكان ارتفاع المضخّة عن السطح الحر للسائل في الخزان هو h_1 ، وبتطبيق معادلة بيرنوللي بين السطح الحر للسائل في خزان التجميع ومدخل المضخّة سنجد :

$$\frac{P_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g\alpha_1}+0=\frac{P_{01}}{\gamma}+\frac{V_{01}^2}{2g\alpha_2}+h_1+h_{f_1} \qquad (6-1)$$

و بإصلاح هذه المعادلة و باعتبار $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$ نجد :

$$\frac{P_1-P_{01}}{\gamma}=h_1+\frac{V_{01}^2-V_1^2}{2g\alpha}+h_{f1} \qquad (6-2)$$

تسمى القيمة $\frac{P_1-P_{01}}{\gamma}$:ارتفاع عمل السحب .

كذلك الأمر لو نظرنا إلى الأنبوب الذي يعلو المضخّة والذي يُسمى أنبوب الطرح وطبقنا معادلة بيرنوللي سنجد :

$$\frac{P_{02}-P_2}{\gamma}=h_2+\frac{V_2^2-V_{02}^2}{2g\alpha}+h_{f2} \qquad (6-3)$$

حيث : h_{f1},h_{f2} تمثل الضياعات بالاحتكاك في أنبوب السحب وانبوب الطرح على التوالي

ولكن سرعة دخول السائل إلى المضخة V_{01} تساوي سرعة خروج السائل منها V_{02} *وبالتالي يمكن ان نكتب ،بتجميع المعادلتين السابقتين :*

$$\frac{P_{02}-P_{01}}{\gamma}=h_1+h_2+\frac{V_2^2-V_1^2}{2g\alpha}+\frac{P_2-P_1}{\gamma}+h_{f1-2} \quad (6-4)$$

يُدعى الحد $\frac{P_{02}-P_{01}}{\gamma}$ بإرتفاع العمل الكلّي للمضخّة ويُرمز له بالرمز (h_w).

6.2-حساب ارتفاع عمل السحب :

بالعودة الى العلاقة التي تحسب عمل السحب وإذا افترضنا أن $V_1 = 0$أي أن سرعة السائل في خزان التجميع تساوي الصفر (تغذية ثابتة) وإذا رمزنا لارتفاع عمل السحب بالرمز (H_1) فإن قيمته ستكون :

$$H_1 = \frac{P_1 - P_{01}}{\gamma} \qquad (6-5)$$

من الوضح أن هذه القيمة تتعلق بقيمة الضغط عند السطح الحر للسائل في خزان التجميع P_1 وكذلك بقيمة الضغط التخلخلي داخل المضخّة P_{01} و بالوزن النوعي للسائل .

توضيح :

لكي يكون عمل السحب في قيمته العظمى يجب أن يكون P_1 في أعلى قيمة له ، وعادة ماتكون هذه القيمة هي قيمة الضغط الجوي ومن الصعب التحكم بها ، أما P_{01}يمكن التحكم بها ولكن ضمن حدود لايمكن تجاوزها وهي الوصول بها لقيمة الصفر (الضغط التخلخلي المطلق) ، فإذا افترضنا أن السائل المستخدم هو الماء سنحصل على القيم التالية :

$$\frac{P_{atm}}{\gamma_{H20}} = \frac{10^5}{1000 \times 10} = \frac{10^5}{10^4}\frac{N/m^2}{N/m^3} = 10 \text{ m} \qquad (6-6)$$

أي أن الارتفاع الأعظمي لعمل السحب (ارتفاع عمل السحب) والذي يمثل طول أنبوب السحب (بُعد المضخة عن السطح الحر للماء) لن يكون أكثر من 10 m .

ولكن : إذا انخفض الضغط التخلخلي إلى الصفر (نظرياً) فإن المضخّة لن تعمل بشكل مرضي أو مفيد وذلك لأن الماء سوف يتحول إلى بخار بسبب انخفاض الضغط في داخل المضخّة ، وبالتالي ستنخفض كفاءة المضخة وسيحدث فيها ما يُسمّى الطَّرق (حادثة التكهُّف)وهذا سيؤدي إلى اهتراء سريع للمضخّة ويقلل من مردودها وعمرها الافتراضي إلى الحدود الدنيا .

وعليه فقد اعتُبر الارتفاع المثالي لعمل السحب ما بين 7 m و8 m حيث تعمل المضخّة عند هذا الارتفاع بطريقة مرضية .

وبالعودة مرة أخرى الى علاقة حساب عمل السحب ولنكتبها بالشكل التالي :

$$h_1 = \frac{P_1 - P_{01}}{\gamma} - \frac{V_{01}^2}{2g\alpha} - h_{f1} \qquad (6-7)$$

نلاحظ : لكي تكون h_1 في قيمتها العظمى يجب أن يتوفر في أنبوب السحب الشروط التالية :

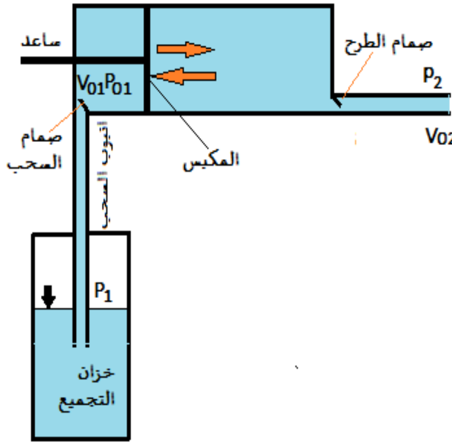
1- قطر أنبوب السحب اكبر مايمكن حتى تنخفض القيمة $\frac{V_{01}^2}{2g\alpha}$

2- يجب ان يكون أنبوب السحب خالي من أي عوائق (تفصيلات) تعيق الجريان كالأكواع والصمامات وغيرها من التفصيلات وبالتالي ستنخفض قيمة h_{f1} .

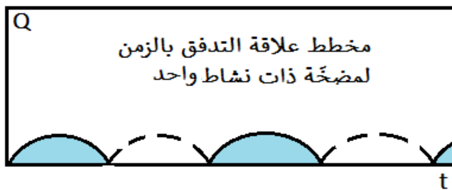
3- يجب أن يكون الضغط التخلخلي P_{01} أقل مايمكن ، ولكن بالتأكيد أكبر من P_c(الضغط الحرج للسائل).

6.3-المضخّة المكبسيةالترددية : تتألف المضخّة المكبسية الترددية من حجرة يتحرك بداخلها مكبس كما في الشكل (2 – 6) ب ، فعندما يبتعد عن مدخل أنبوب السحب يغلق صمام أنبوب الطرح وبالتالي يُحدث تخلخلاً في داخل الحجرة مما يؤدي إلى سحب السائل من أنبوب السحب إلى الحجرة ، وعند رجوع المكبس مقترباً من أنبوب السحب يُغلَق صمامهُ و يُفتَح صمام أنبوب الطرح وبالتالي يتدفق السائل الموجود ضمن الحجرة إلى انبوب الطرح.

يُطلق على هذا النوع من المضخّات اسم المضخّة المكبسيّة ذات الطور (الدور) الواحد الذي سينقسم إلى شوطين، الشوط الأول ينسحب السائل إلى الحجرة من انبوب السحب ويكون انبوب الطرح مغلقاً وفي الشوط الثاني يتم تفريغ الحجرة إلى انبوب الطرح وبالتالي إلى الخارج. ويظهر المخطط البياني لمثل هذه المضخّات كما في الشكل (6-2) ب .



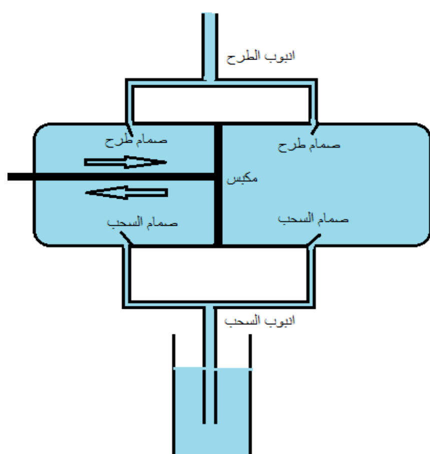
الشكل (2 -6) أ



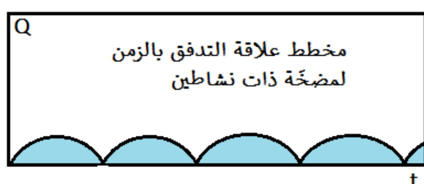
الشكل (2 – 6) ب

ومن أجل زيادة مردود هذا النوع من المضخّات فقد تم ابتكار مضخّة مكبسية مزدوجة الشوط كما في الشكل (3 – 6) أ ، حيث يتوضع المكبس في منتصف الحجرة بحيث يتم سحب السائل من أحد فرعي انبوب السحب وذلك حسب اتجاه حركة المكبس يميناً أو يساراً ويتم التحكم بتصميم الصمامات في فرعي انبوب السحب وفي فرعيّ أنبوب الطرح بحيث يُغلقان ويُفتحان على التناوب ليؤمنا تدفقاً مستمراً .

و يظهر المخطط البياني لهذا النموذج من المضخّات المكبسية كما في الشكل (3 – 6) ب.



الشكل (3 – 6) أ



الشكل (3 – 6) ب

6.3.1-حساب التدفق في المضخّة المكبسيّة :

يمكن حساب التدفق الذي تؤمنه المضخّة المكبسيّة ذات الشوط الواحد من خلال معرفة حجم السائل المتدفق خلال الشوط الواحد للمكبس وذلك بمعرفة مساحة مقطع الحجرة ومعرفة المسافة التي يقطعها هذا المكبس ومن ثم نضرب بعدد الأشواط في الثانية أو في الدقيقة أو.....

فإذا كانت مساحة مقطع الحجرة A وطول الشوط الذي يقطعه المكبس هو ℓ وعدد الأشواط في الدقيقة هو n ستكون كمية السائل المتدفقة نظرياً خلال دقيقة هو :

$$Q_{th} = A.\ell.n \qquad (6-8)$$

وسيكون التدفق النظري خلال ثانية واحدة :

$$Q_{th} = A.\ell.\frac{n}{60} \qquad (6-9)$$

أما التدفق الحقيقي فهو أقل من ذلك لسببين :

1- حجرة المضخة لا تمتلىء بالكامل في شوط السحب .

2- وجود ضياع في السائل نتيجة التسرب .

لذلك لابد من إدخال معامل تصحيح $\boldsymbol{\eta}$ يُسمّى معامل التدفق ولذلك نجد أن التدفق الحقيقي بالثانية سيكون :

$$Q_{th} = \eta . A . \ell . \frac{n}{60} \qquad (6-10)$$

6.3.2- حساب ارتفاع عمل السحب للمضخّة المكبسية :

لحساب ارتفاع عمل السحب للمضخّة المكبسيّة نطبق معادلة بيرنوللي بين نقطتين إحداهما تقع على السطح الحر للسائل في خزان السحب (البئر مثلاً) والثانية في نهاية أنبوب السحب (مدخل المضخّة) و باعتبار ان مستوي المقارنة ينطبق على السطح الحر للسائل في خزان السحب وسنأخذ بعين الاعتبار كل الضياعات التي يمكن أن تحصل في أنبوب السحب :

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g\alpha_1} + 0 = \frac{P_{01}}{\gamma} + \frac{V_{01}^2}{2g\alpha_2} + \Delta P_A + \Delta P_B + Z + h_f \qquad (6-11)$$

حيث :

ΔP_A– هو فرق الضغط المطلوب للتغلب على قوى عطالة السائل (وزن السائل) .

ΔP_B - هو فرق الضغط المطلوب للتغلب على مقاومة صمام السحب (عدم رجوع) .

h_f - هو ضياع الحمولة بالاحتكاك في خط السحب .

Z– هو ارتفاع المضخّة عن السطح الحر للسائل في خزان التجميع .

بضرب طرفيّ المعادلة السابقة بالوزن النوعي γ واجاء إعادة ترتيب لحدود المعادلة نحصل :

$$P_{01} = P_1 - \rho gz - \frac{\rho V_{01}^2}{2\alpha} - \Delta P_A - \Delta P_B - \rho g h_f \qquad (6-12)$$

وكما بات معروفاً فإن ضغط السحب P_{01} يجب أن يكون دائماً أقل من الضغط الجوي P_1 وأكبر من الضغط الجزئي الحرج P_c للسائل أي أن :

$$P_1 \geq P_{01} \geq P_c \qquad (6-13)$$

أي أنَّ :

$$P_{01} = P_1 - \rho g z - \frac{\rho V_{01}^2}{2\alpha} - \Delta P_A - \Delta P_B - \rho g h_f \geq P_c \qquad (6-14)$$

و إذا قسمنا طرفيّ المعادلة السابقة على γ و أصلحنا ترتيب الحدود سنجد :

$$Z \leq \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_c}{\gamma} - \frac{V_{01}^2}{2g\alpha} - \frac{\Delta P_A}{\gamma} - \frac{\Delta P_B}{\gamma} - h_f \qquad (6-15)$$

من هذه المعادلة يتضح لنا مايلي :

يتوجب على المضخّة أن تؤمن ضغطاً تخلخلياً يستطيع التغلب على :

1- الضياعات بالاحتكاك h_f
2- الضياعات نتيجة قوى العطالة ΔP_A
3- الضياعات في صمام السحب ΔP_B
4- إعطاء قدرة حركية للسائل $\frac{V_{01}^2}{2g}$
5- التغلب على ارتفاع السحب zبحيث يصل السائل الى المضخّة .

وكل هذه العوائق يجب أن تحقق شرطاً أساسياً – ألّا يكون الضغط التخلخلي P_{01} أدنى من الضغط الحرج P_c ولابد من التذكير أن قيمة هذا الارتفاع *Z* يجب ألّا تتجاوز *8* أمتار حتى تعمل المضخة بأداءٍ مُرضيٍ و آمن .

6.3.3- حساب ارتفاع عمل الطرح للمضخّة المكبسيّة :

عندما يتحرك مكبس المضخّة باتجاه دفع السائل الى انبوب الطرح فإنه سيقوم بعمل يُصرف على مايلي :

1- رفع السائل الى الارتفاع Z_2 .
2- التغلب على قوى الاحتكاك في انبوب الطرح h_{f2} .
3- التغلب على مقاومة قوى عطالة السائل الموجود في اسطوانة المكبس وفي انبوب الطرح ولنرمز لها بالرمز h_A .
4- التغلب على المقاومة الهيدروليكية لصمام الطرح ولنرمز له بالرمز h_B .
5- اكساب السائل في انبوب الطرح قدرة حركية $\frac{V_{02}^2}{2g\alpha}$.
6- اعطاء السائل ضغطاً ثابتاً في نهاية انبوب الطرح h_P .

وبالتالي سيكون عمل طرح المضخّة (حمولة طرح المضخّة) *H* كما يلي :

$$H = Z_2 + h_{f2} + h_A + h_B + \frac{V_{02}^2}{2g\alpha} + h_p \qquad (6-17)$$

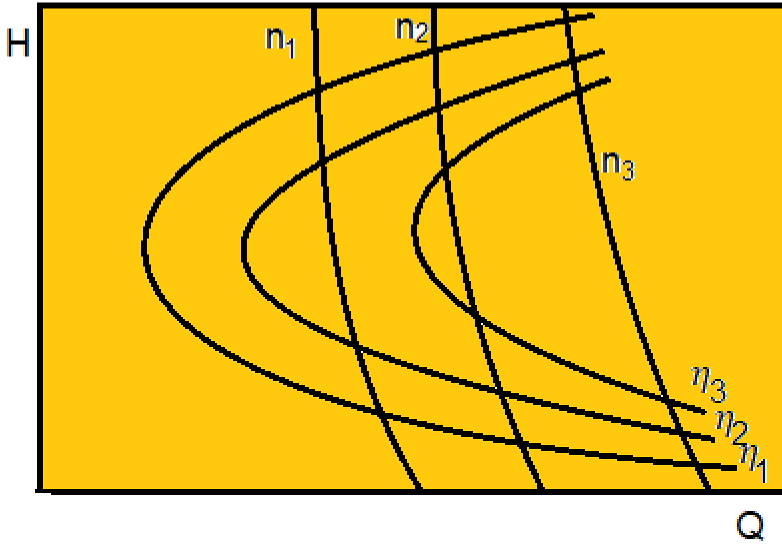
ملاحظة هامة : إن عمل الطرح هو الذي يحدد كفاءة المضخّة ويُعتبر معياراً اساسياً في اختيار المضخّة وملائمتها للمكان الذي ستعمل به و صلاحيتها للوظيفة التي ستقوم بها

6.3.4 - منحنيات الخصائص المميزة للمضخّة :

يوضّح منحني الخصائص للمضخّة العلاقة الكائنة بين التدفق وحمولة الطرح(ارتفاع عمل الطرح)حيث نلاحظ من العلاقة :

$$Q_{th} = \eta A.\ell.n \qquad (6-18)$$

أن التـدفق يتعلـق فقـط بعـدد الأشـواط n أي بعـدد الـدورات الـتي يقـدمها المحـرك الخارجي .لذلك فإن الرسم البياني للعلاقة بين Q و H هو قيمة ثابتة متغيرها الوحيد هو n ويظهر بالشكل (4 – 6) :



الشكل (4 – 6)

يُعتبر عمل الطرح في المضخّات المكبسية غير محدود ،حيث تقدم المضخّة الى انبوب الطـرح السـائل دون النظـر الى مقاومـة الاحتكاك في الشـبكة ،إذ أن المضـخّة تعـطي في عملها الحمولة اللازمة للتغلب على المقاومات الهيدروليكية في الأنبوب ،لـذلك فإن التوقفات والأعطال في عمل المضخّة تحصل إذا زادت الحمولات المُسببة عن التحكم في الصمامات الموجـودة في انبوب الطـرح .وعليه يجـب الانتباه الى ان التحكم في كمية التدفق لهذا النوع من المضخّات يتم فقط في صمامات أنبوب السحب .

6.3.5- حساب استطاعة المضخّة المكبسيّة :

تُعطى استطاعة المضخّة المكبسيّة بعلاقة تربط بين تدفق السائل Q المضخوخ وبين ارتفاع عمل الطرح H (حمولة الطرح) كما يلي :

$$N_{th}=Q.H.\rho.g \qquad (6-19)$$

حيث :

Q– التدفق الحجمي .

H- ارتفاع عمل الطرح .

لاحظ أن واحدة قياس الاستطاعة ستكون($N.m/s$)أي واحدة قياس الاستطاعة (Watt) .

6.3.6- مردود المضخّة المكبسيّة:

هو النسبة بين الاستطاعة المفيدة N_n والاستطاعة التي يُقدمها المحرّك للمضخة N ، وعادةً ما يُرمز للمردود بالرمزη أي :

$$\eta = \frac{N_n}{N} \qquad (6-20)$$

حيث يُحدَّد هذا المردود بالنظر لعدة عوامل اهمها :

1- الضغط الضائع نتيجة الاحتكاك داخل المضخّة .
2- الاستطاعة الضائعة نتيجة الاحتكاك بين اجزاء المضخّة .

6.4- المضخة النّابذة : Centrifugal Pump :

تتألف المضخّة النّابذة من الاجزاء الرئيسية التالية :

1- هيكل ثابت له شكل حلزوني في أغلب الاحيان .
2- فَرّاش (دولاب) ذو أجنحة ، إما أن تكون مستقيمة أو منحنية ، يُثَبَّت على محور يأخذ حركته من محرك خارجي .
3- فتحتان في الهيكل ليتصل بهما أنبوبا السحب والطرح .
4- محرّك خارجي (كهربائي أو ديزل أو بخاري أو .....) يتصل محوره بفَراش المضخّة .
5- فتحة ثالثة في الهيكل يُدخَل من خلالها محور المحرك ويجب أن تكون مزوّدة بمانع تسرب (جوانات).

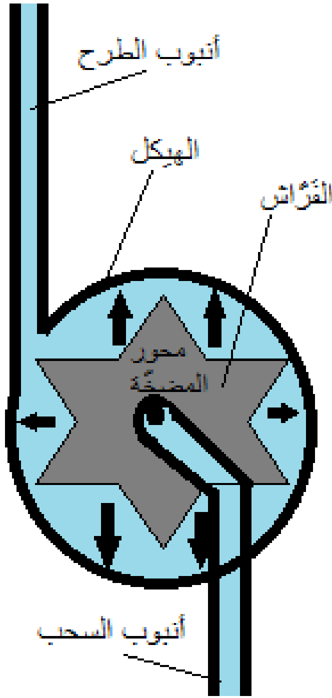
6.4.1- مبدأ عمل المضخّة النّابذة :

يؤدي دوران المحور إلى دوران الفَرّاش الموجود ضمن الهيكل فيختطف السائل الواصل من أنبوب السحب ويقذفه الى محيط الهيكل بفضل قوى الطرد المركزي نتيجة الدوران ،وبفضل الموجّه الحلزوني يخرج السائل الى انبوب الطرح فتتفرَّغ أقنية الفرّاش عند خروج السائل منها مما يؤدي الى انخفاض الضغط في هذه المنطقة ، و هذا متيستدعي حُلول سائل مكانه من خط السحب وذلك تحت تأثير فرق الضغط

تتكرر هذه العملية بسرعة يُحددها عدد دورات المحرك لتعطي تدفقاً مستمراً من خلال انبوب الطرح.

ومن الطبيعي أن هناك انواع مختلفة للمضخّات النّابذة وذلك تبعاً لما يلي :

1- عدد الفَرّاشات .
2- طريقة انحناء الفَرّاشات
3- ضغط الطرح (ارتفاع عمل الطرح) فمنها ذات ضغط منخفض يصل الى 60 متراً ومنها ذات ضغطٍ مرتفع قد يصل حتى 200 متر .
4- حسب طريقة وصل السائل الى المضخّة (بمدخل او أكثر
5- حسب نوع الهيكل .
6- حسب وضعيّة محور المضخّة وهل التدفق محوري أو قطري .
7- حسب طريقة خروج السائل من المضخّة .
8- حسب طريقة وصل المضخّة مع المحرك.
9- حسب الهدف من استعمال المضخّة .

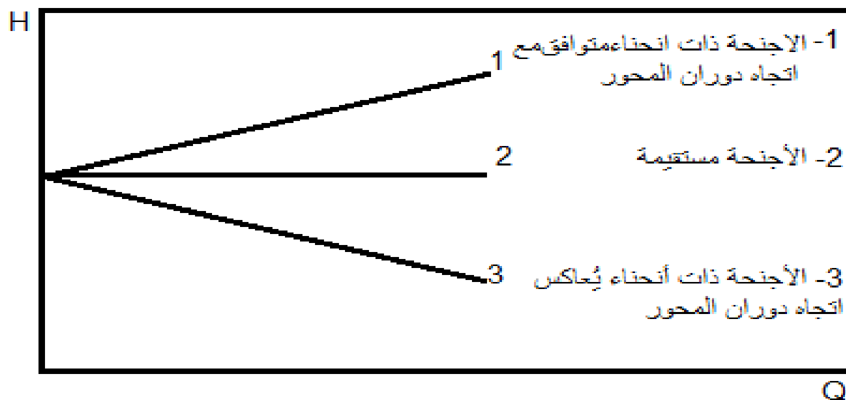


الشكل (5 – 6) المضخّة النابذة

6.4.2 - إمكانية عمل المضخّة النابذة :

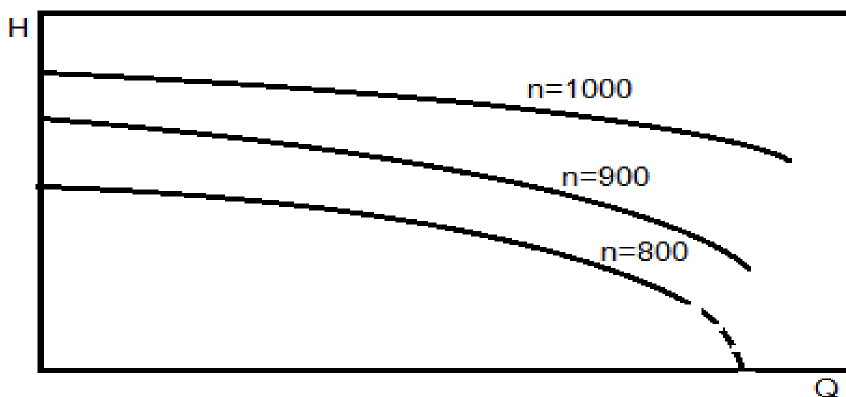
تتعلق إمكانية عمل المضخّة النابذة بطريقة تصميمها ، ومع ذلك فإن المبادىء النظرية تؤكد أن ارتفاع العمل الكلي للمضخّة يتعلق بالتدفق الحجمي للسائل وهي علاقة خطيّة تقريباً ، ويتعلق ميل هذا المستقيم في إحداثيات العلاقة (Q-H) بتركيب

وشكل الفراشات (الأجنحة) فإذا كان انحناء الأجنحة باتجاه دوران المحور يكون المستقيم ذا ارتفاع متزايد ،أما إذا كان الإنحناء بعكس دوران المحور فسيكون المستقيم ذا ارتفاع متناقص .كما يوضّح الشكل التالي الخصائص المميزة (نظري) للمضخّة النابذة :



الشكل (6 – 6)

هذا وقت اثبتت التجارب العملية للسوائل الحقيقية أن علاقة التدفق الحجمي للسائل وارتفاع العمل الكلّي للمضخّة تختلف في الواقع عن المستقيمات المذكورة سابقاً إذ تظهر في التدفقات المختلفة حادثة التكهف التي تكون في حدودها الدنيا عندما تكون انحناءات الاجنحة معاكسة لدوران محور المضخّة .ولذلك انتشر استعمال هذا النوع من المضخات في الحياة العملية أكثر من غيره وعليه فسوف نطبق دراساتنا اللاحقة على هذا النوع فقط . فالعلاقة بين Q وH بدلالة عدد دورات المحرك n سوف تظهر كما يوضح الشكل (6-7) :

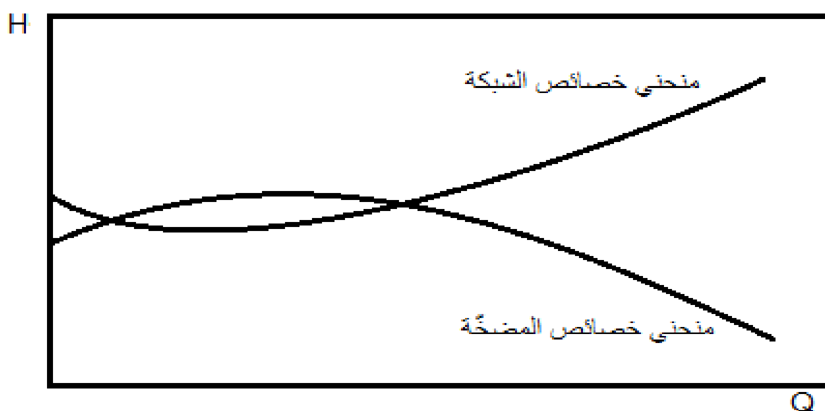


الشكل (7 – 6)

حيث يُلاحظ أنه بازدياد عدد الدورات يرتفع المنحني و يتوضع في القسم الأعلى من المخطط ،هذا يعني ارتفاع عمل اعلى للمضخّة .كما يُظهر هذا المخطط أنه من أجل

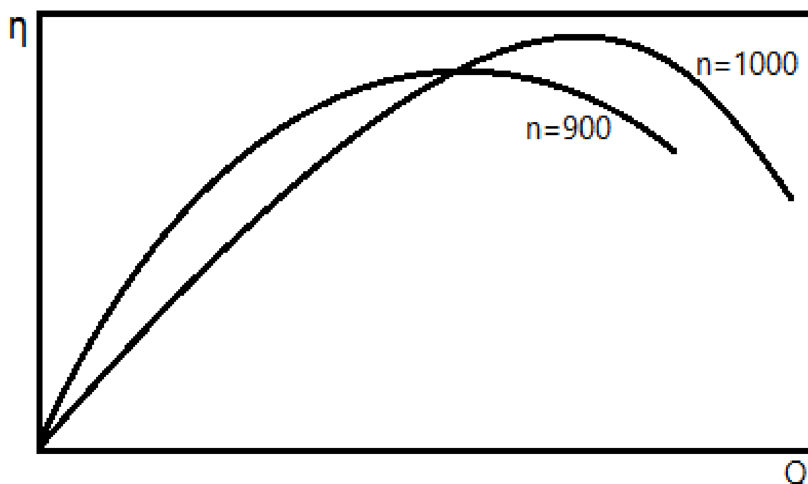
تفق ثابت يمكن الحصول على ارتفاع عمل كلي أكبر بزيادة عدد الدورات . كما يبيّن المنحني أن التدفق الحجمي الذي تنتجه المضخّة عند عدد معين من الدورات هو ذو قيمة نهائية ، وتُعطى القيمة العظمى للتدفق الحجمي من أجل ارتفاع عمل كلّي للمضخّة يساوي الصفر .

ونبيّن في المنحني التالي القيمة الأعظميّة للعمل الكلّي في بعض الأنواع من المضخّات الذي لا يلبث أن يتغير بتغيّر التدفق ، حيث يمكن القول أن المضخّة يمكن أن تقدم ارتفاع عمل كلّي أعظمي عند قيمة معينة للتدفق .

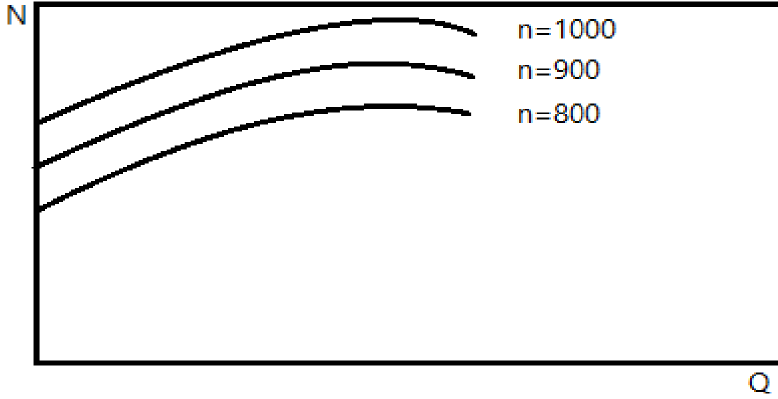


الشكل (8 – 6)

وبنفس الطريقة يمكن متابعة الخصائص الأُخرى للمضخّة ضمن منحنيات الخصائص المميزة فتّعطى علاقة المردود مع التدفق الحجمي أو علاقة استطاعة المضخّة مع التدفق الحجمي كما تُظهر المنحنيات التالية (9 – 6) و (10 – 6) :

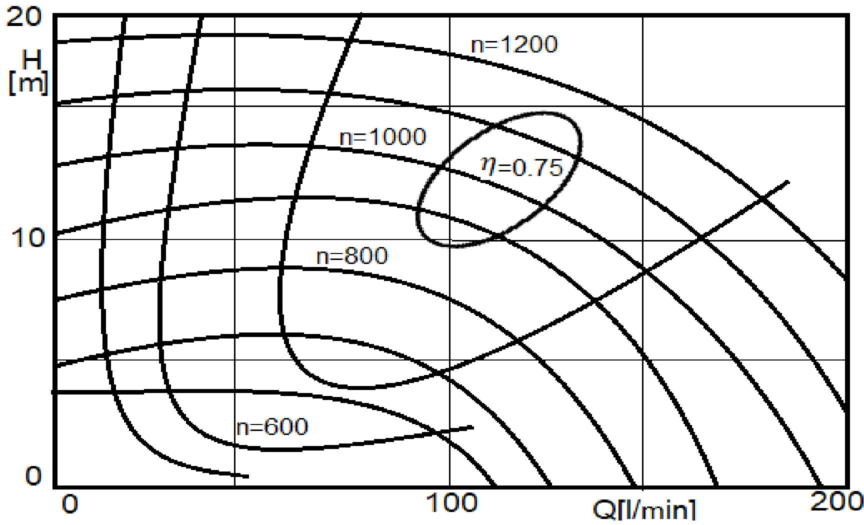


الشكل (9 – 6)



الشكل (10 – 6)

تُدعى هذه المنحنيات والرسوم البيانيّة السابقة باسم المنحنيات البسيطة المميزة للخصائص ، وعادة ما تقوم شركات تصنيع المضخّات بوضع منحني مميز واحد يجمع فيه عدة علاقات في آنٍ واحد كما يوضّح الشكل (11 – 6) :



الشكل (11 – 6)

حيث تظهر علاقة التدفق الحجمي مع ارتفاع العمل الكلّي وتُعبّر الخطوط فيه عن قيمٍ ثابتة للاستطاعة ولعدد الدورات المختلفة .

يُستخدم هذا المنحني العام لتحديد خصائص المضخّة النّابذة بعد معرفة اثنتين منها ، ولكن مثل هذه المنحنيات المميزة تعتبر خاصة من أجل نوع معين من المضخّات وحتى تعتبر خاصة لمضخّة واحدة ولنقل سائل محدد حيث أن تغير الشروط سيؤدي

الى تغيّرٍ في توضُّع الخطوط المميزة وذلك نظراً للتغير في خصائص السائل كاللزوجة والكثافة وغيرها .

6.4.3- حساب ارتفاع عمل السحب للمضخّة النّابذة :

بالعودة الى المعادلة :

$$h_1 = \frac{P_1 - P_{01}}{\gamma} - \frac{V_{01}^2}{2g\alpha} - h_{f1}$$

يمكننا أن نجد ارتفاع السحب للمضخّة النابذة و لكن يجب أن نستعيض عن الضياغات بالاحتكاك h_{f1} بقيمة كل الضياعات التي تحدث في انبوب السحب والتي يمكن التعبير عنها كضياع للضغط في خط السحب نتيجة الاحتكاك ونتيجة التفصيلات التي يمكن ان تتواجد في انبوب السحب و عطالة السائل وغيرها من الضياعات التي تُسبب فرقاً في الضغط ، وعليه ستصبح المعادلة على الشكل التالي :

$$h_1 = \frac{P_1 - P_{01}}{\gamma} - \frac{V_{01}^2}{2g\alpha} - \frac{\Delta P}{\gamma}$$

ومن البديهي أن نعتبر أن سرعة دخول السائل الى المضخّة تساوي سرعة جريان السائل في انبوب السحب ، ولابد من التذكير ان ضغط السحب في داخل المضخة يجب ان يكون أكبر من ضغط الأبخرة المشبعة للسائل لتجنب حادثة التكهف.

6.4.4- استطاعة المضخّة النّابذة :

كما وجدنا سابقاً ، فإن ارتفاع العمل الكلي يُعطى بالعلاقة التالية :

$$\frac{P_{02} - P_{01}}{\gamma} = h_1 + h_2 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g\alpha} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + h_{f1-2}$$

حيث يمكن أن نعبّر عن ارتفاع العمل الكلي بالرمز ($-h_w$)الذي يُمثّل فرق الضغط الذي تؤمنه المضخّة ويُكتب مع اشارة السالب كدليل على أن المضخّة تكتسب عملاً من محرك خارجي وليس هي التي تقوم بالعمل ، وليس لهذه الاشارة السالبة أي معنىً حسابي

وعليه يمكن أن تصبح علاقة حساب الاستطاعة على الشكل التالي :

$$N_{th}=Q.\rho.g(-h_w)$$

وبما أن ($-h_w$) يُمثّل فرق الضغط الذي تؤمنه المضخّة ،يُمكننا أن نكتب :

$$P_{02} - P_{01} = \Delta P = \rho g(-h_w)$$

أي أننا يمكن أن نحسب استطاعة المضخّة من خلال معرفة فرق الضغط :

$$N_{th}=Q.\Delta P$$

أما مردود المضخّة فيُعطى بالعلاقة :

$$\eta = \frac{N_{act}}{N_p}$$

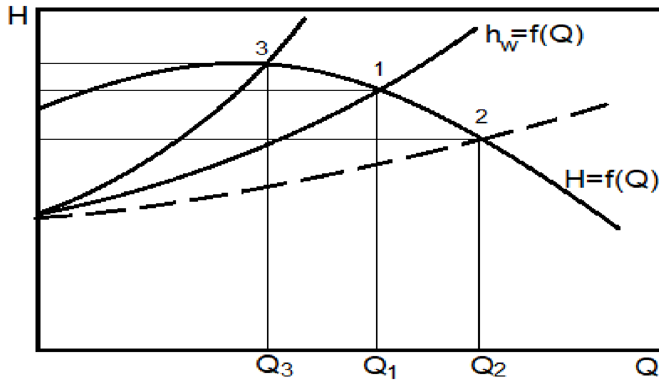
حيث : N_{act} - هي الاستطاعة المفيدة

N_p - هي الاستطاعة الحقيقية التي يُعطيها المحرك الخارجي الى المضخّة .

ومنه نستنتج : لكي نحسب استطاعة المضخّة النّابذة يجب أن نحسب فرق الارتفاع وضياعات الحمولة الحركية (الطاقة الحركية) وضياعات حمولة الضغط والضياعات بالاحتكاك وضياعات الحمولة الموضعيّة .

6.4.5- طرق الاستفادة من المنحنيات المميزة للخصائص في المضخّات :

إذا أردنا أن نعلم كمية السائل الذي يمكن لمضخّة نابذة أن تضخّه ، فيتوجب أن نرسم منحني خط العمل المميز للأنبوب إلى جانب المنحني المميز للخصائص ، حيث يُحدِّد هذا المنحني من علاقة بيرنوللي للقدرة وذلك بحساب قيمة العمل الكلي (h_w) من أجل تدفقات مختلفة ونحدد من خلال نقطة تقاطع المنحنيين (منحني المضخّة ومنحني الانبوب) قيمة التدفق الحجمي و ارتفاع عمل المضخّة كما هو واضح في المخطط البياني في الشكل (12 – 6) :



الشكل (12 – 6)

من الشكل السابق يتضح أنه إذا أُجريت أي إصلاحات على المجموعة التي تعمل بها المضخّة كخفض الضياعات أو خفض مستوى السائل في الخزان الذي يُضخ إليه السائل مثلاً ،فسنحصل على منحني خط العمل المميز للأنبوب $h_w=f(Q)$ بانحناء أقل وسيتقاطع مع المنحني المميز لخصائص المضخة في النقطة 2 مثلاً التي تقابل حجماً متدفقاً أكبر وبالعكس إذا كان انحناء خط العمل أكبر والتي يمكن أن يسببه إغلاق صمام ما في خط الطرح مثلاً ، فإنه سيتقاطع مع المنحني المميز للمضخّة مثل 3 والتي تقابل تدفقاً أقل .نستنتج من ذلك أنه في المضخّات النابذة يمكن التحكم في تدفق المضخّة عن طريق التحكم في فتحة صمام أنبوب الطرح وهنا لابد من التذكير أن إغلاق صمام أنبوب الطرح بشكل كامل سيجعل التدفق صفراً ولكن لا ينخفض مردود المحرك في المضخّة أي أن القدرة الحقيقية للمحرك تبقى ثابتة .

إن توضّع المنحني المميز للمضخّة يؤثر على عملها ، فإذا كان هذا المنحني أعلى من منحني العمل للشبكة (الأنابيب) فإن المضخّة لا تعمل . وكذلك يُصادف أحياناً أن يتقاطع المنحني المميز للمضخّة والمنحني المميز للأنبوب في أكثر من نقطة (حين يكون لمنحني المضخّة قيمة أعظميّة) عندها تعمل المضخّة ضمن هذا المجال –بين هاتين النقطتين – ولا يمكن للمضخّة أن تعمل في الأقسام الأخرى إلا إذا تم رفع عدد دورات المحرك المستخدم للمضخّة .

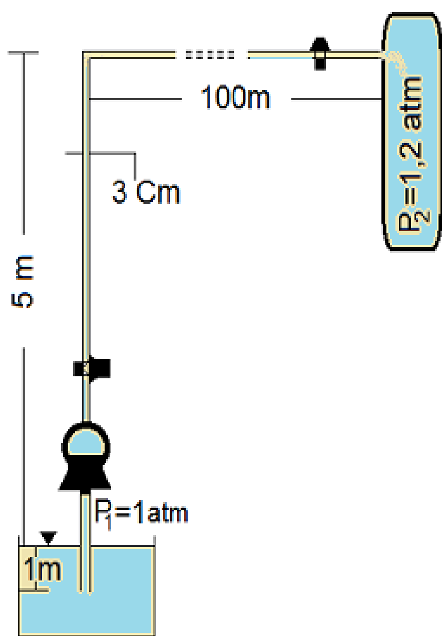
6.4.6- مميزات و مساوئ المضخّة النابذة :

1. تعتبر هذه المضخّات غير معقدة من الناحية التصميمية وبالتالي يمكن صناعتها من مواد مختلفة كالخلائط المعدنية واللدائن والبورسلان وغيرها ،مما يمكّن من استخدامها لنقل سوائل عادية أو حمضية أو قلوية أو مستحلبات أو معلقات ...... الخ .
2. سهلة الوصل للمحركات الكهربائية وتعمل بدورات سريعة مما يخفض من حجمها .
3. تُعطي تدفقاً مستمراً غير متقطع .
4. سهلة الصيانة ورخيصة الثمن نسبياً .
5. لا تسبب زيادة المقاومة في أنبوب الطرح أيّ أضرار للمضخّة مما يسمح بالتحكم في تدفقها عن طريق التحكم المباشر بصمام أنبوب الطرح .
6. لها مجال تدفق واسع ،كما شاهدنا من المنحنيات المميزة لخصائص المضخّة .
7. لا تستطيع تشكيل فرق ضغط تخلخلي عميق ،وبذلك يُعتبر ارتفاع عمل المضخّة النابذة محدوداً ولا يتعدّى 50 متراً .

8. مردود المضخة النابذة أقل من مردود المضخة المكبسية حيث أن مردودها لا يتجاوز *0.85*
9. يجب أن تكون المضخة ممتلئة بالسائل المطلوب نقله ، إذ أن وجود الهواء والأبخرة في أنبوب السحب لا يمكّن المضخّة من تشكيل الضغط التخلخلي المطلوب .
10. تتميز المضخّات النابذة بحجمها الصغير أمام المضخّات الأخرى .

مثال للتوضيح :

احسب استطاعة مضخّة نابذة لنقل البنزن في الدرجة *C 20* حيث التدفق الكتلي *1000 Kg/h* و ذلك من خزان الى مفاعل الضغط بداخله يزيد عن الضغط الجوي بمقدار *0,2 atm* حيث طول الانبوب الكلي *100 m* وقطره *3 Cm* والمسافة الشاقولية من فوهة المفاعل الى السطح الحر للسائل في الخزان هي *5 m* بينما يغطس انبوب السحب تحت السطح الحر بمقدار *1 m* والضغط في الخزان هو الضغط الجوي كما يبين الشكل (6-13) .افترض أن الخشونة النسبيّة للأنابيب *n=0.001* و كثافة البنزن $0.88\ Kg/m^3$ *وأعتبر أن اجمالي الضياعات الموضعيّة تساوي* 0.5m.



الشكل (13 – 6)

الحل :

تُعطى استطاعة المضخّة بالعلاقة :

$$N_{th}=Q.\rho.g(-h_w)$$

ولنحسب كل حد من حدود هذه المعادلة وفق المعطيات المتوفرة في نص المسألة .

1 -حساب التدفق : إن التدفق المُعطى في نص المسألة هو التدفق الكتلي ،بينما التدفق الذي يجب تطبيقه في المعادلة السابقة هو التدفق الحجمي وبواحدة قياس m^3/s لذلك يجب أن نجري التحويل المناسب بالقسمة على كثافة البنزن بعد تحويل واحدة قياسها من $0.88\ gr/Cm^3$ لتصبح ($880\ Kg/m^3$) وبالقسمة على *3600* للتحويل من الساعة إلى الثانية :

$$Q=\frac{1000}{880\times3600}=0.00032\ \frac{m^3}{s}$$

وطالما توفر لدينا التدفق لنحسب السرعة بقسمة التدفق على مساحة مقطع الأنابيب المستعملة بعد تحويل واحدة قياسها إلى المتر لنجد :

$$V_2=\frac{Q}{A}=\frac{Q}{\pi\frac{d^2}{4}}=\frac{0,00032}{\pi\frac{0.03^2}{4}}=0,44\ m/s$$

2-الكثافة معروفة من نص المسألة والجاذبية الأرضيّة معروفة .

3- حساب ($-h_w$) : من المعروف سابقاً نستطيع حساب (h_w) من العلاقة :

$$(-h_w)=\frac{P_{02}-P_{01}}{\gamma}=\Delta h\quad+\frac{V_2^2-V_1^2}{2g\alpha}+\frac{P_2-P_1}{\gamma}+h_F$$

أ- حساب Δh :

من نص المسألة فإن المسافة الشاقولية من فتحة المفاعل وحتى السطح الحر للبنزن في الخزان هي 5 m وكذلك يغطس انبوب السحب 1 m تحت السطح الحر للسائل لذلك فإن فرق الارتفاع الكلي سيكون :

$$\Delta h=5+1=6\ m$$

ب- حساب حد السرعة $\frac{V_2^2-V_1^2}{2g\alpha}$:

إن سرعة البنزن في الخزان V_1 تساوي الصفر باعتبار أن السطح الحر ثابتاً ، أما السرعة V_2 في الانابيب فقد تم حسابها سابقاً *0,44 m/s* وكذلك يجب معرفة قيمة α وذلك بحساب قيمة رقم *Re* لمعرفة طبيعة الجريان هل هو صفحي أم مضطرب ولذلك سنستخدم الجداول لمعرفة لزوجة البنزن بالدرجة *20* C^0 حيث نجد:

$$\mu=0.7\ CP=0,0007\ \frac{NS}{m^2}$$

وعليه سيكون رقم رينولدز :

$$Re=\frac{\rho wd}{\mu}=\frac{880\times0,44\times0,03}{0,0007}=16594,3$$

وبالتالي الجريان مضطرب وستكون قيمة $\alpha=1$ وعليه يمكن أن نحسب حد السرعة :

$$\frac{V_2^2-V_1^2}{2g\alpha}=\frac{0,44^2}{2\times9,81\times1}=0.01\ m$$

ج - حساب حد الضغط $\frac{P_2-P_1}{\gamma}$:

إن الضغط عند فوهة أنبوب السحب سيساوي الضغط الجوي *1 atm* مضافاً إليه وزن عمود البنزن من السطح الحر إلى الفوهة الغاطسة بمقدار *1 m* ، أما الضغط في المفاعل فهو *1,2 atm* أي:

$$P_1 = 1 \times 1{,}0133 \times 10^5 + 1 \times 880 \times 9{,}81 = 1.1 \times 10^5 \, \mathrm{N}/_{\mathrm{m}^2}$$

$$P_2 = 1{,}2 \times 1{,}0133 \times 10^5 = 1{,}216 \times 10^5 \, N/_{m^2}$$

$$\frac{P_2 - \mathrm{P}_1}{\gamma} = \frac{(1{,}216 - 1.1) \times 10^5}{880 \times 9.81} = 1{,}35 \text{ m}$$

د – **حساب الضياعات الإجمالية** h_F :

وتتضمن الضياعات الموضعيّة التي أُعطيت بنص المسألة $h_L=0{,}5 \quad m$ والضياعات الخطية والتي سنحسبها بمساعدة معادلة دارسي المعروفة :

$$\mathrm{h_f} = \lambda \frac{V^2}{2\mathrm{g}} . \frac{\ell}{\mathrm{d}}$$

واضح من معادلة دارسي أن كل القيم باتت متوفرة لدينا ماعدا معامل الاحتكاك λ الذي يمكن معرفته من المخطط (7 – 5) استناداً لقيمة *Re* و قيمة *n* المتوفرتين لذلك نجد $\lambda = 0{,}029$ وعليه سنجد قيمة h_f :

$$h_f = 0{,}029 \times \frac{0{,}44^2}{2 \times 9{,}81} \times \frac{100}{0{,}03} = 0{,}985 \, m$$

وبالتالي ستكون إجمالي الضياعات الخطية والموضعية هي :

$$h_F = 0{,}985 + 0.5 = 1{,}485 \, m$$

الآن وقد اصبحت كل القيم متوفرة يمكننا معرفة قيمة ارتفاع العمل الكلّي h_w :

$$h_w = 6 + 0{,}01 + 1{,}35 + 1{,}485 = 8{,}845 \, m$$

وبالتعويض بعلاقة حساب الاستطاعة نجد :

$$N = 0{,}00032 \times 880 \times 9{,}81 \times 8{,}845 = 24.43 \, watt$$

وهي استطاعة المضخّة اللازمة لنقل البنزن من الخزان إلى المفاعل ضمن الشروط

الفصل السابع

السوائل اللانيتونية

يهدف هذا الفصل الى تقديم توضيح لسلوك الموائع غير النيوتونية في مجال متنوع من التطبيقات، في الطبيعة والصناعة. حيث نستعرض وصفا لأنواع مختلفة من الخصائص اللانيوتونية كما سيتم عرض أمثلة تشبيهية للمواد (المواد الرغوية، والمعلّقات، ومحاليل البوليمر والمصهورات) و التي تظهر عند ظروف مناسبة ذات قوام خفيف و تسلك سلوكاً تُبدي فيه مقاومة بسيطة لقوى القص او ذات قوام ثخين تبدي فيه مقاومة كبيرة لقوى القص او لدناً لزجاً يعتمد على الزمن او مرناً لزجاً.

كما تم لاحقا توضيح كل نوع من أنواع سلوك الموائع اللانيوتونية عبر المعطيات التجريبية على مواد حقيقية. تلا ذلك مناقشة قصيرة حول كيفية هندسة خصائص التدفق للسوائل اللانيوتونية لمركب سائل تجريبي من أجل الاستخدام النهائي المرضي عن طريق التلاعب في بنيته المجهرية من خلال التحكم في الجوانب الفيزيائية الكيميائية للنظام.

و سنتطرق أخيراً إلى السؤال النهائي حول دور الخصائص اللانيوتونية في تحليل ونمذجة العمليات ذات الأهمية الهندسية التطبيقية.

7-1- مقدمة :

تُظهر معظم المواد ذات الوزن الجزيئي المنخفض مثل الموائع العضوية وغير العضوية، ومحاليل الأملاح غير العضوية ذات الوزن الجزيئي المنخفض، والمعادن والأملاح المنصهرة، والغازات خصائص التدفق النيوتوني، أي عند درجة الحرارة والضغط الثابتين وفي القص البسيط يكون إجهاد القص (τ) متناسبًا مع معدل القص ($\dot{\gamma}$)، وثابت التناسب هو اللزوجة الديناميكية المألوفة (μ). تُعرف هكذا موائع تقليدياً باسم الموائع النيوتونية. وكما هو معروف فإن معظم السوائل تقل لزوجتها مع ارتفاع درجة الحرارة وتزداد مع ازدياد الضغط. أما بالنسبة للغازات فإنها تزداد مع كل من درجة الحرارة والضغط . وبشكلٍ عام كلما ازدادت لزوجة المادة كلما ازدادت مقاومتها للتدفق (وبالتالي تكون أكثر صعوبة للضخ). يبين الجدول (7-1) القيم النموذجية للزوجة عشرات الموائع الشائعة .

المركب المائع	اللزوجة التحريكية pa.s
هواء	10^{-5}
ماء	10^{-3}
كحول ايتيلي	$1,2x10^{-3}$
زئبق	1.5×10^{-3}
ايثيلين غليكول	20×10^{-3}
زيت زيتون	0,1
غليسيرين 100%	1,5
عسل	10
شراب الذرة	100
قار	108
زجاج مصهور	1012

جدول (7-1) قيم اللزوجة للموائع الشائعة في درجة حرارة الغرفة

كما هو واضح اننا كلما اتجهنا إلى الأسفل في الجدول تزداد اللزوجة بعدة أضعاف، وبالتالي يمكن للمرء أن يجادل بأن المادة الصلبة يمكن تُعامل كمائع تتجه لزوجته نحو اللانهاية ∞ ←μ. بالتالي، فإن الفارق بين المائع والمادة الصلبة ليس دقيقاً كما قد كنا نعتقد! منذ أن تمت صياغة معادلات الاستمرارية (الكتلة) وكمية الحركة (Cauchy, Navier-Stokes) فإن ديناميكيا الموائع النيوتونية قد قطعت شوطًا طويلاً في القرون الثلاثة الماضية أو ما يقاربها، وإن بقيت هناك تحديات كبيرة خاصة في مجال الاضطراب والتدفق متعدد الطور.

كان هناك اعتراف متزايد خلال العقود الستة الماضية بحقيقة أن العديد من المواد ذات الأهمية الصناعية - لا سيما تلك ذات الطبيعة متعددة الطور (مثل الرغويات، والمستحلبات، والمشتتات، والمعلقات، والمواد المِلاطية) ومصهورات ومحاليل البوليمرات (سواء الطبيعية أو من صنع الإنسان) - لا تتوافق مع فرضية نيوتن عن العلاقة الخطية بين (τ) و ($\dot{\gamma}$) في القص البسيط مثلاً.

تُعرَّف بالتالي هذه الموائع وبشكل مختلف بأنها موائع غير نيوتونية، أو غير خطية، أو معقدة، أو معقدة من الناحية الانسيابية. يعطي الجدول (2-7) قائمة تمثيلية من الموائع التي تُظهر أنواعاً مختلفة وبشدّة متفاوتة من سلوك التدفق اللانيوتوني .

مستحضرات التجميل ومنتجات العناية الشخصية (طلاء الأظافر، والمستحضرات والكريمات، أحمر الشفاه، الشامبو، رغاوي وكريمات الحلاقة، معجون أسنان، وما إلى ذلك)	المواد الغذائية (معجون ومركزات الفواكه/الخضار، الصلصات، صلصة السلَطة، المايونيز، المربى ومربى البرتقال، المثلجات، الحساء، الخلائط ومواد التغطية الخاصة بالكاتو، بياض البيض، عجينة الخبز، وجبات خفيفة)
المشروبات (البيرة، الخمور، الخ)	الشحوم وزيوت التزليق
مخلفات المناجم والمعلقات المعدنية	ملاط فضلات الحيوانات من مزارع الماشية
الموائع البيولوجية (الدم، السائل الزليلي، اللعاب، وما إلى ذلك)	مصهور ومحالي البوليمرات، والبلاستيك المعزَّز والمطاط
القار	الدهانات والملمعات والورنيش
معجون الأسمنت والملاط	معلقات عجينة الورق
ملاط الطباشير	ملاط الخث والليغنيت
الشوكولاتة	الحمم المنصهرة والماغما
ملاط الفحم	ألوان الطباعة والأحبار
المواد اللاصقة (مثلاً، عجينة ورق الحائط، لواصق السجاد)	منتجات الألبان وتيارات نفايات منتجات الألبان (مثلاً، الجبن والزبدة واللبن والقشدة الطازجة ومصل اللبن)
المنتجات الدوائية (مثلاً، الكريمات، والرغويات، والمعلقات)	حمأة مياه الصرف الصحي
طين الحفر	رمل الشاطئ الرطب
المواد الرغوية الخاصة بمكافحة الحرائق	خامات النفط الشمعية

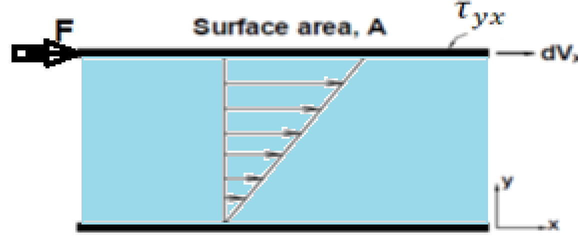
جدول (1-7)-أمثلة على المواد التي تظهر سلوك الموائع غير النيوتونية

في الواقع إن الموائع اللانيوتونية واسعة الانتشار في الطبيعة وفي التكنولوجيا لدرجة أنه لن يكون من قبيل المبالغة أن نقول إن سلوك الموائع النيوتونية هو الاستثناء وليس القاعدة . يسعى هذا الفصل لتقديم مقدمة موجزة لأنواع مختلفة من خصائص التدفق اللانيوتوني، وتوصيفاتها وآثارها في التطبيقات الهندسية. ويجب الانتباه الى أن فرضيتي خاصية الاستمرارية وعدم الانضغاط متضمَّنتان طوال مناقشتنا التالية.

7-2-تصنيف سلوك الموائع :

7-2-1-تعريف المائع النيوتوني :

سوف نبدأ بمراجعة سريعة للتعريف بالمائع النيوتوني حيث في القص البسيط كما في الشكل (7-1) .

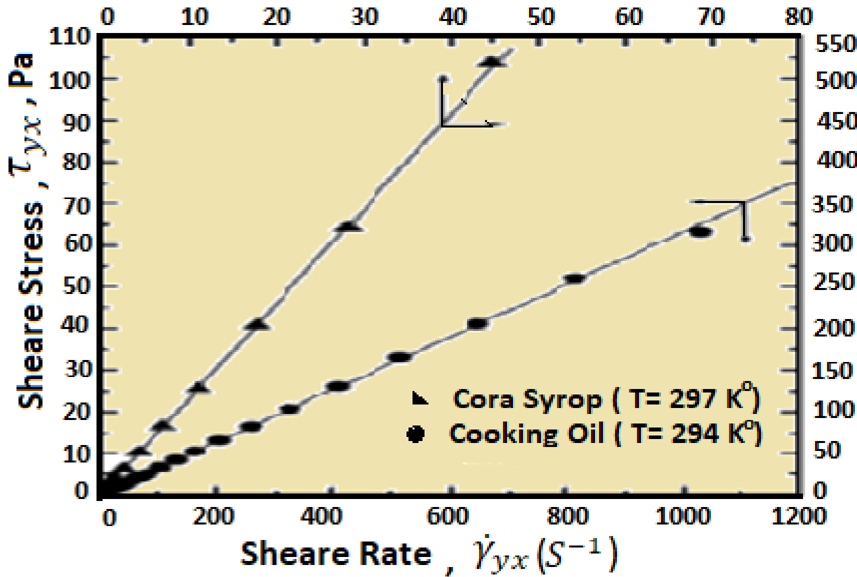


شكل (7-1) تمثيل تخطيطي لتدفق قصي أحادي الاتجاه

تتميز استجابة المائع النيوتوني بعلاقة خطية بين إجهاد القص المطبق ومعدل القص، أي:

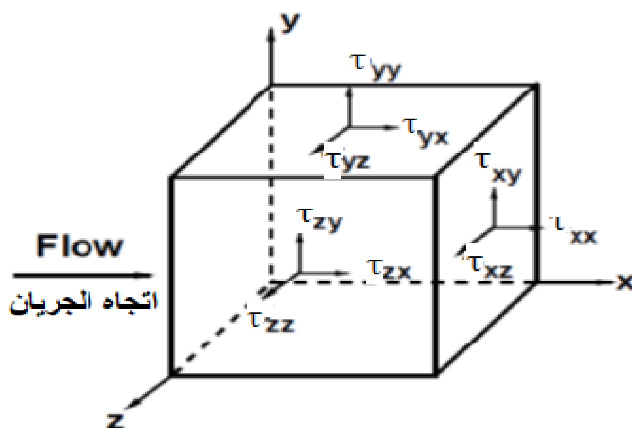
$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} = \mu \, \dot{\gamma}_{yx} \qquad (7\text{-}1)$$

ويوضح الشكل (7-2) نتائج تجريبية لشراب الذرة ولزيت الطهي تؤكد سلوكهما كموائع نيوتونية. حيث تمرّ منحنيات التدفق من المركز وقيم اللزوجة هي μ= 11.6 Pa.s لشراب الذرة وμ = 64 mPa.s لزيت الطبخ. و هذا الشكل هو التمثيل البياني للمعادلة (7-1) وهي تمثّل أبسط الحالات حيث يوجد مكون واحد فقط غير صفري للسرعة V_x وهو تابع لـ y.



شكل (7-2) : معطيات نموذجية لإجهاد قص - معدل قص لمائعين نيوتونيّن

أما بالنسبة للحالة العامة التي يكون فيها التدفق ثلاثي الأبعاد كما يبين الشكل (3-7):



شكل(3-7): مكونات الإجهاد في تدفق ثلاثي الأبعاد

من الواضح أن هناك ستة مركبات قصيّة (مماسية) وثلاثة مركبات (ناظمية) لمتجه الإجهاد (تنسور الاجهاد) (stress tensor) **S**. من المعتاد تقسيم الإجهاد الكلي إلى جزء ناظمي المناحي (الضغط) وجزء يدلل على الانحراف (deviatoric) عن الاتجاه الناظمي (اجهادات القص المماسية) كالتالي:

$$S = -P\,I + \tau \qquad (7-2)$$

في هذه المعادلة فإن المركبات المكوّنة لإجهاد القص المماسي تعدم بعضها بحيث يصبح τ لا أثر له (traceless)، أي:

$$\tau = 0$$

وسيكون الضغط متطابقاً مع معادلة الاستمرار حيث تتناظر المتجهات المماسية الستة وتعدم بعضها البعض $\tau=\tau^T$ وتبقى ثلاث مكونات قص مستقلة (عناصر غير قطرية) و ثلاثة إجهادات ناظمية (عناصر قطرية) من إجهاد الانحراف (deviatoric) و بالتالي تصبح العلاقات في الإحداثيات الديكارتية كما يلي :

$$\tau_{xy}= (\tau_{yx}),\ \ \tau_{xz}=(\tau_{zx}),\ \ \tau_{yz} =(\tau_{zy})$$

و فرقي الإجهاد الطبيعيين المعرَّفين كالتالي:

فرق الإجهاد الناظمي الأساسي الأول :

$$N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy} \qquad (7 - 3)$$

وفرق الإجهاد الناظمي الأساسي الثاني:

$$N_2 = \tau_{zz} - \tau_{yy} \qquad (7-4)$$

بالنسبة للموائع النيوتونية ترتبط هذه المكونات خطياً بمعدل مكونات ممتدّ التشوه عن طريق اللزوجة العددية. على سبيل المثال، يمكن كتابة مكونات الإجهاد الثلاثة الفاعلة على الوجه x (الموجه عمودياً على المحور ox) في الشكل (3-7) على النحو التالي:

$$\tau_{xx} = -2\mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \qquad (7-5)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \qquad (7-6)$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \qquad (7-7)$$

يمكن إعداد مجموعات مماثلة من المعادلات لمكونات الإجهاد بالنسبة للمستويين y و z. بالنسبة لمائع نيوتوني، وفي القص البسيط لدينا :

$$\tau_{xx} = \tau_{yy} = \tau_{zz} = 0$$

لأن V_x تختلف فقط في الاتجاه y بالتالي يتطلب التعريف الكامل للمائع النيوتوني تحقيق كامل معادلات Navier-Stokes بدلاً من مجرّد إظهار قيمة ثابتة للزوجة القص.

7-2-2. سلوك الموائع غير النيوتونية :

خلال دراستنا لسلوك الموائع اللانيتونية سوف نستخدم الرموز الرياضية المتعارف على استخدامها في مختلف المراجع العلمية التي تدرس هذا الجانب من ميكانيك السوائل ، بحيث نستخدم الرمز σ للدلالة على اجهادات القص بدلا من الرمز τ ونستخدم الرمز $\dot{\gamma}$ للدلالة على تدرج السرعة (معدل التشوه) بدلاً من $\frac{du}{dy}$

وسنستخدم الرمز η للدلالة على اللزوجة التحريكية بدلا من الرمز μ . بحيث تظهر العلاقة بين اجهادات القص σ و معدل تغير السرعة (معدل التشوه) $\dot{\gamma}$ بالحالة البسيطة لسائل تيوتوني على الشكل التالي :

$$\sigma = \eta\dot{\gamma} \qquad (7-8)$$

وفي الحالة العامة لسائل لانيوتوني على الشكل :

$$\sigma = f(\dot{\gamma}) \qquad (7-9)$$

وسيكون أبسط انحراف عن سلوك الموائع النيوتونية عندما لا تمرّ منحنيات القص البسيط $\dot{\gamma}$ –σ من المركز و/أو لا تؤدي إلى علاقة خطية بين σ و $\dot{\gamma}$. على العكس، إن اللزوجة الظاهرية، والمعرّفة على أنها $\dot{\gamma}$/σ، ليست ثابتة وهي تابعة لـ σ أو $\dot{\gamma}$. في الواقع، وتحت الظروف المناسبة، لا تكون اللزوجة الظاهرية لبعض المواد تابعة فقط لشروط التدفق (هندسيّة الشكل، ومعدل القص، الخ)، لكنها تعتمد أيضاً على التاريخ الحركي لعنصر المائع الذي يتم النظر فيه. يعتبر من المناسب - على الرغم من أنه قد يكون اعتباطياً (وربما غير علميّ أيضاً) - تجميع هكذا مواد في الفئات الثلاث التالية:

1. الأنظمة التي تكون قيمة $\dot{\gamma}$ لها عند نقطة داخل المائع محدّدة فقط بالقيمة الحالية لـ σ عند تلك النقطة. تُعْرف هذه المواد وبشكل مختلف بأنها لزجة بحتة، أو غير مرنة، أو مستقلة زمنياً أو موائع نيوتونية معمَّمة (GNF)
2. الأنظمة التي تُظهر العلاقة بين σ و $\dot{\gamma}$ اعتماداً أكثر على مدة القص والتاريخ الحركي، وهذه تسمى بالموائع المرتبطة بالزمن
3. الأنظمة التي تُظهر مزيجاً من سلوك المائع اللزج ومن السلوك المرن الشبيه بالمادة الصلبة. تُظهر - على سبيل المثال - هذه الفئة من المواد استرداداً (recovery) مرناً جزئياً، أو ارتداداً (recoil)، أو زحفاناً (creep)، الخ. بالتالي، تسمى هذه بالموائع المرنة اللزجة (elastic-visco أو elastico-viscous).

كما أشرنا سابقاً فإن نظام التصنيف المذكور أعلاه هو اعتباطيّ تماماً - على الرغم من ملاءمته - لأن معظم المواد الحقيقية تبدي في الغالب مزيجاً من نوعين أو حتى كل هذه الأنواع من الميزات عند الظروف المناسبة. على سبيل المثال، ليس من غير المألوف بالنسبة لمصهور بوليمر أن يُبدي سلوكاً مستقلاً عن الزمن (مخففاً للقص) ولزجاً مرناً في آن واحد، وبالنسبة لمعلَّقٍ من طين الخزف الصيني أن يُظهر مجموعة من الميزات المستقلة عن الزمن (مخففة للقوام بالقص أو مثخِّنة للقوام بالقص) وميزات معتمدة على الزمن (متميّع بالرجّ (thixotropic)) عند بعض التراكيز و/أو عند معدلات قص مناسبة. بشكل عام، من الممكن تحديد الجانب اللانيوتوني المهيمن واستخدامه كأساس للحسابات العملية اللاحقة. كل نوع من سلوك المائع اللانيوتوني يتم التعامل معه الآن بمزيد من التفصيل.

7-2-2-1- سلوك المائع المستقل عن الزمن :

كما أشرنا أعلاه، في القص الأحادي الاتجاه البسيط تتميز هذه المجموعة الفرعية من الموائع بحقيقة أن القيمة الحالية لمعدل القص عند نقطة في المائع يتم تحديدها فقط بالقيمة الحالية الموافقة لإجهاد القص والعكس بالعكس. على العكس من ذلك، يمكن للمرء أن يقول إن مثل هذه الموائع ليس لها ذاكرة عن تاريخها السابق. بالتالي، يمكن وصف سلوك القص المستقر الخاص بها من خلال علاقة من الشكل:

$$\dot{\gamma}_{yx} = f(\sigma_{yx}) \qquad (7-10)$$

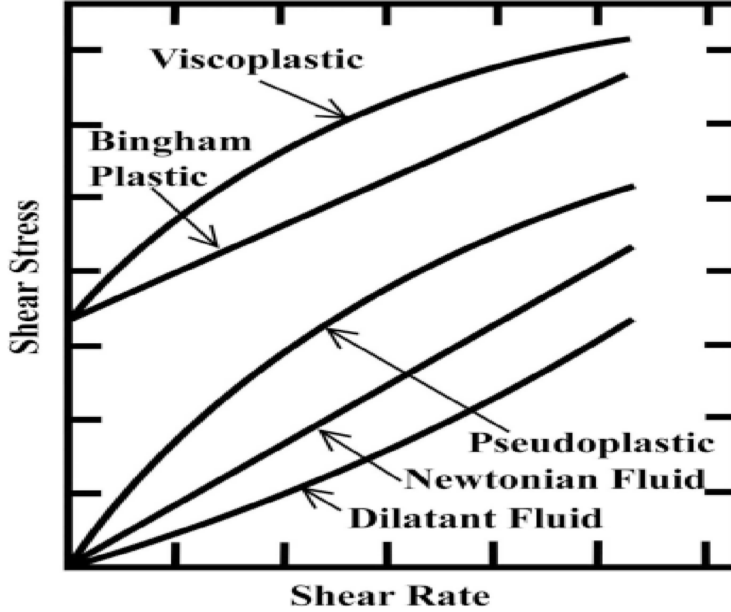
أو من الشكل المعاكس:

$$\sigma_{yx} = f^{-1}(\dot{\gamma}_{yx}) \qquad (7-11)$$

اعتماداً على شكل المعادلة (10- 7) أو (11- 7)، توجد الاحتمالات الثلاثة:

1. سلوك مخفّف للقوام بالقص أو زائف اللدونة (pseudoplastic)
2. سلوك لزج لدن (visco-plastic) مع أو دون سلوك مخفف للقوام بالقص
3. سلوك مثخّن للقوام بالقص أو موسِّع (dilatant).

يوضح الشكل (4-7) نوعياً منحنيات التدفق (وتسمى أيضاً مخططات الجريان) (rheograms) على إحداثيات خطية للفئات الثلاث من سلوك المائع المذكورة أعلاه. كما يتضمن أيضاً العلاقة الخطية النموذجية للموائع النيوتونية.



شكل (4-7): منحنيات التدفق النوعي لأنواع مختلفة من الموائع غير النيوتونية

7-2-2-2- الموائع المخفّفة للقوام بالقص :

ربما يكون هذا النوع هو الأكثر مصادفةً من بين أنواع الموائع ذات السلوك اللانيوتوني المستقل عن الزمن في الممارسة الهندسية. حيث يتميز بلزوجة ظاهرة η (يتم تعريفها بـ $\sigma_{yx}/\dot{\gamma}_{yx}$) والتي تقلّ تدريجياً مع زيادة معدل القص. في الأنظمة البوليميرية (المصهورات والمحاليل) وعند معدلات قص منخفضة تقترب اللزوجة الظاهرية من

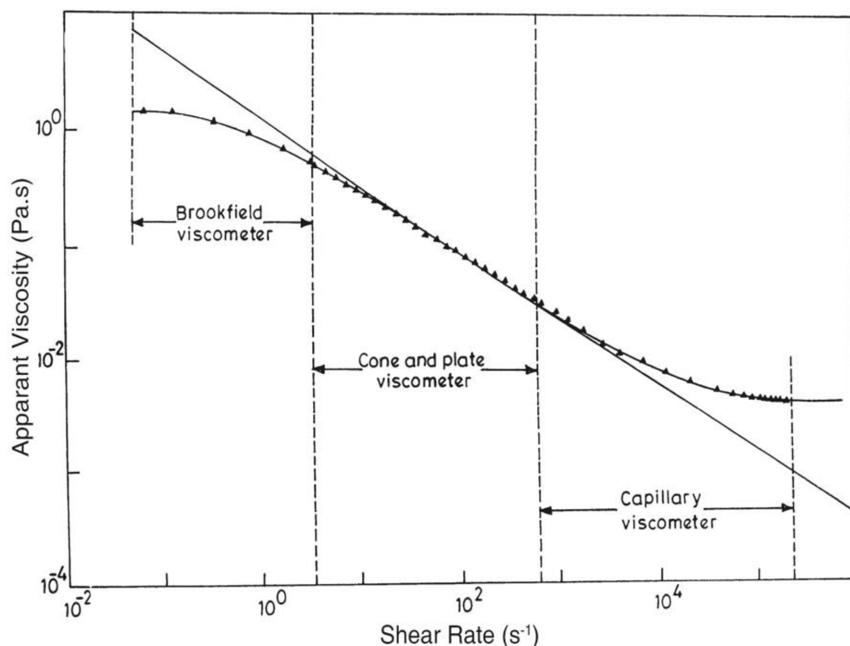
لزوجة السائل النيوتوني حيث تكون اللزوجة مستقلة عن معدل القص (لزوجة قص صفرية η_0).

$$\lim_{\dot{\gamma}_{yx}\to 0} \frac{\sigma_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = \eta_0 \qquad (7-12)$$

علاوة على ذلك، تظهر محاليل البوليمر فقط هضبة مماثلة عند معدلات قص عالية جداً (لزوجة قص لانهائية η_∞) أي :

$$\lim_{\dot{\gamma}_{yx}\to \infty} \frac{\sigma_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = \eta_\infty \qquad (7-13)$$

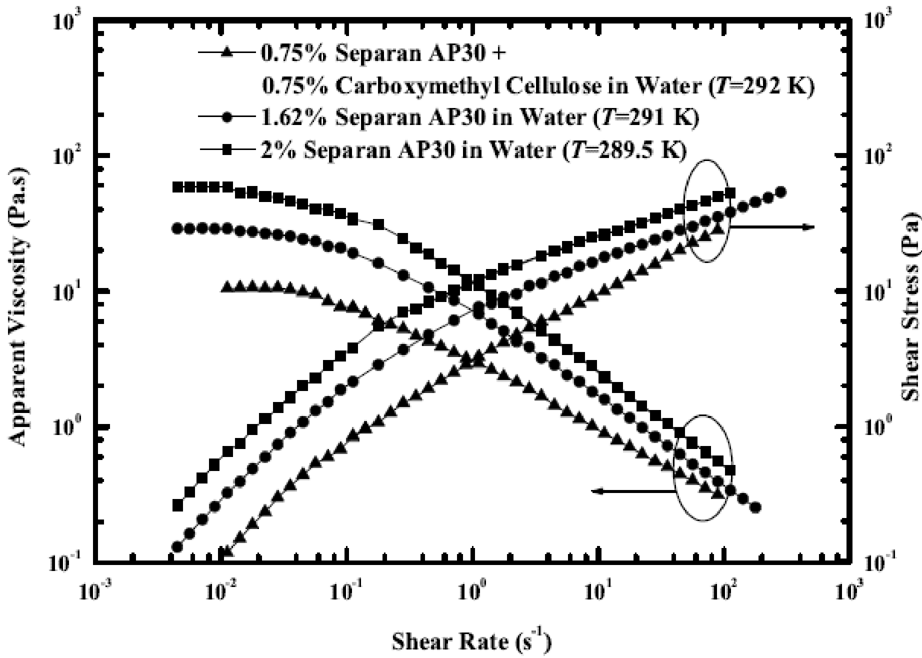
إن قيمة η_0 . هي في معظم الحالات أعلى قليلاً فقط من لزوجة المذيب η_S. يوضح الشكل (5-7) هذا السلوك في محلول بوليمر يشمل طيفاً كاملاً من القيم تتراوح بين η_0 و η_∞ .



شكل (5-7): توضيح للزوجات القص الصفري واللانهائي لمحلول بوليميري

من الواضح أنه لا يمكن رؤية الحد اللانهائي القص لمصهورات ومزائج البوليمير، أو الرغويات أو المستحلبات أو المعلقات. تنخفض بالتالي اللزوجة الظاهرية للمادة الزائفة اللدونة مع ازدياد معدل القص.

و يبيّن الشكل (6-7) العلاقة بين اللزوجة و معدل القص واجهاد القص لثلاثة محاليل بوليمرية .



شكل 6-7: إجهاد القص التمثيلي وسلوك اللزوجة الظاهرية لثلاثة أنواع من محاليل البوليمر

حيث لا تبدو فقط قيم η_0 مختلفة في كل حالة ولكن يشاهد أيضاً أن معدل انخفاض اللزوجة مع معدل القص يختلف من نظام إلى آخر بالإضافة إلى أخذ فترة معدل القص بعين الاعتبار. أخيراً، تتأثر قيمة معدل القص التي تحدّد بداية تخفيف القوام بالقص بعدة عوامل مثل طبيعة وتركيز البوليمر، وطبيعة المذيب، إلخ، بالنسبة لمحاليل البوليمر وشكل قياس الجسيمات وتركيز المواد الصلبة في المعلقات، على سبيل المثال. لذلك من المستحيل اقتراح تعميمات صالحة، ولكن تُظهر العديد من الأنظمة البوليمرية منطقة لزوجة القص الصفري تحت $\dot{\gamma} < 10^{-2}\ s^{-1}$. عادةً ما تتوسع منطقة لزوجة القص الصفري كلما نقص الوزن الجزيئي للبوليمر، أو كلما ضاق توزيع الوزن الجزيئي الخاص به، أو كلما انخفض تركيز البوليمر في المحلول.

إن السؤال التالي الذي يتبادر إلى الذهن على الفور هو: كيف يمكننا تقريب سلوك هذا النوع من المائع؟ لقد تم على مدى حوالي الـ 100 سنة الماضية طرح العديد من المعادلات الرياضية المختلفة التعقيد والأشكال في أدبيات هذا العلم، بعضها هو عبارة عن محاولات بسيطة لملاءمة البيانات التجريبية بيانياً ($\sigma - \dot{\gamma}$)، بينما يوجد لدى البعض الآخر أساسٌ نظري (ممزوج بالتجريبي) في الميكانيك الإحصائي كامتدادٍ لتطبيق النظرية الحركية على الحالة السائلة .

7-2-2-3- قانون القوة أو معادلة Ostwald de Waele :

في كثير من الأحيان يمكن تقريب العلاقة بين إجهاد القص (σ) ومعدل القص ($\dot{\gamma}$) لمائع مخفف للقوام بالقص والمرسومة على إحداثيات لوغاريتمية إلى خط مستقيم على مدى فترة من معدل القص، أي:

$$\sigma = m(\dot{\gamma})^{n} \qquad (7-14)$$

أو بالنسبة للزوجة الظاهرية:

$$\eta = m(\dot{\gamma})^{n-1} \qquad (7-15)$$

من الواضح أنه من أجل $0 < n < 1$ سينتج $(d\eta/d\dot{\gamma}) < 0$، أي أن الموائع التي تسلك سلوكاً مخفِّفاً للقوام بالقص تتميز بقيمة *n* (مؤشر قانون القوة) أصغر من الواحد. تُظهر العديد من مصهورات ومحاليل البوليميرات قيماً لـ *n* في نطاق 0,3-0,7 و وفقاً للتركيز والوزن الجزيئي للبوليمر.

حتى أنه يمكن مصادفة قيم أصغر لمؤشر قانون القوة ($n \sim 0.1–0.15$) بالنسبة لمعلقات الجسيمات الدقيقة مثل الكاولين في الماء، والبنتونيت في الماء، إلخ. بطبيعة الحال، كلما كانت قيمة *n* أصغر كلما كانت المادة مخففةً أكثر للقص. الثابت الآخر m (مؤشرالاتساق) هو مقياس لاتساق (consistency) المادة.

على الرغم من أن المعادلتين (14 – 7) أو (15 – 7) تقدم أبسط تقريبٍ للسلوك المخفّفٍ للقص، فإنها لا تتوقع أياً من الصعيدين النيوتونيين لا الأعلى ولا الأسفل ضمن الحدود $\dot{\gamma} \to 0$ أو $\dot{\gamma} \to \infty$. بالإضافة إلى ذلك فإن قيم *m* و*n* تكون ثابتة إلى حد ما فقط على مدى فترة ضيقة من نطاق معدل القص ، حيث يحتاج المرء إلى أن يعرف بداهةً المدى المحتمل لمعدل القص الذي ستتم مواجهته في التطبيق المتوخّى.

7-2-2-4- معادلة اللزوجة لـ Cross :

من أجل تصحيح بعض نقاط الضعف في قانون القوة، قدم Cross الشكل التجريبي التالي والذي اكتسب قبولاً واسعاً في أدبيات هذا الموضوع. تُكتب المعادلة في القص البسيط كالتالي:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + m(\dot{\gamma})^{n}} \qquad (7-16)$$

من الممكن بسهولة مشاهدة أنه من أجل $n < 1$ فإن هذا النموذج يتنبأ أيضاً بالسلوك المخفّفٍ للقص. علاوة على ذلك تتم استعادة النهاية النيوتونية هنا عندما $m \to 0$.

على الرغم من أن اقتراح Cross (16 – 7) في البداية في أن تكون $n = 3/2$ كان مرضياً للعديد من المواد، فإنه يُعتقد الآن أن معاملة n كبارامتر قابل للتعديل يقدّم تحسناً كبيراً من جهة درجة الملاءمة . من الواضح أن المعادلة (16 – 7) تتنبأ وبشكل صحيح أن $\eta = \eta_0$ و $\eta = \eta_\infty$ عند النهايات $\dot{\gamma} \to 0$ و $\dot{\gamma} \to \infty$ على التوالي.

7-2-2-5-نموذج السائل لـ Ellis :

في حين أن نموذجي اللزوجة المقدمين حتى الآن هما مثالان من شكل المعادلة (7–11) فـإن نمـوذج Ellis هـو توضـيح عـن الشـكل العكسي وهـو المعادلـة (7–10). يُكتـب النموذج في القص البسيط أحادي الاتجاه على الشكل:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_{1/2}}\right)^{\alpha - 1}} \qquad (7 - 17)$$

η_0 في المعادلة (17 – 7) هي لزوجة القص الصفري، والبارامتران المتبقيان $\sigma > 1$ و $\sigma_{1/2}$ يتم ضبطهما للحصول على أفضل مطابقة لمجموعة معينة من البيانات. من الواضح أنه بالنسبة لـ $\alpha > 1$ تَنتُج القيم المتناقصة للزوجة القص مع زيادة معدل القص. يمكن المشاهدة بسهولة أن النهاية النيوتونية يمكن استعادتها عن طريق وضع $\sigma_{1/2} \to \infty$. علاوة على ذلك، عندما يكون $\sigma/\sigma_{1/2}) \gg 1$ فإن المعادلة (17 – 7) تعود إلى نموذج قانون القوة، أي إلى المعادلتين (14 – 7) أو (15 – 7).

7-2-2-6- سلوك المائع اللزج اللدن :

يتصف هذا النوع من سلوك المائع غير النيوتوني بوجود إجهاد العتبة (يسمى إجهاد الخضوع أو إجهاد الخضوع الظاهري σ_0) والذي يجب أن يتم تجاوزه لكي يتشوّه (يُقَصّ) المائع أو يتدفق. على العكس من ذلك فإن هكذا مادة ستسلك سلوك المادة الصلبة المرنة (أو تتدفق مثل جسمٍ صلب) عندما يكون الإجهاد الخارجي المطبق أقل من إجهاد الخضوع σ_0. طبعاً، حالما يتجاوز مقدار إجهاد الخضوع الخارجي القيمة σ_0 فإن المائع يمكن أن يُظهر سلوكاً نيوتونياً (قيمة ثابتة لـ η) أو خصائص مخففة للقوام بالقص، أي$\eta(\dot{\gamma})$ بالتالي من المنطقي – بغياب تأثيرات التوتر السطحي – أن هكذا مادة لن تستوي تحت تأثير الجاذبية لتشكّل سطحاً حراً مسطحاً تماماً. يمكن افتراض هذا النوع من السلوك كمياً كالتالي: تتألف هكذا مادة في حالة الراحة من بنى ثلاثية الأبعاد ذات صلابة كافية لتقاوم أي إجهاد خارجي أقل من $|\sigma_0|$ وتقدِّم بالتالي مقاومةً عاليةً للتدفق، على الرغم من أنها ما تزال قابلةً للتشوه بشكلٍ مرن. لكن من أجل

مستويات إجهاد أعلى من | σ0|فإن البنية تتحطم وتسلك المادة سلوك المادة اللزجة. وُجد في بعض الحالات أن بناء وتحطيم البنية كان عكوساً، أي أن المادة يمكن أن تكسب مجدّداً قيمة إجهاد الخضوع (الأولية أو أقل منها بقليل).

يُدعى المائع ذو منحني التدفق الخطّي من أجل $|\sigma 0| < |\sigma|$ بمائع Bingham اللدن، ويتصف بقيمة ثابتة للزوجة η_B. بالتالي يُكتب نموذج Bingham في القص الأحادي الاتجاه كما يلي:

$$\sigma_{yx} = \sigma_0^B + \eta_B\, \dot{\gamma}_{yx} \qquad |\sigma_{yx}| > |\sigma_0^B| \qquad (7-18a)$$

$$\dot{\gamma}_{yx} = 0 \qquad |\sigma_{yx}| < |\sigma_0^B| \qquad (7-18a)$$

من ناحية أخرى، تُعرف المادة اللزجة اللدنة التي تُظهر سلوكاً مخفِّفاً للقوام بالقص عند مستويات ضغط تتجاوز $|\sigma_0|$ بالمائع الزائف لدونة الخضوع (-yield pseudoplastic)، وغالباً ما يتم تقريب سلوكهم بما يسمى بنموذج السائل Herschel-Bulkley الذي يكتب لتدفق القص الأحادي البعد (1-D) على النحو التالي:

$$\sigma_{yx} = \sigma_0^H + m\left(\dot{\gamma}_{yx}\right)^n \qquad |\sigma_{yx}| > |\sigma_0^H| \qquad (7-19a)$$

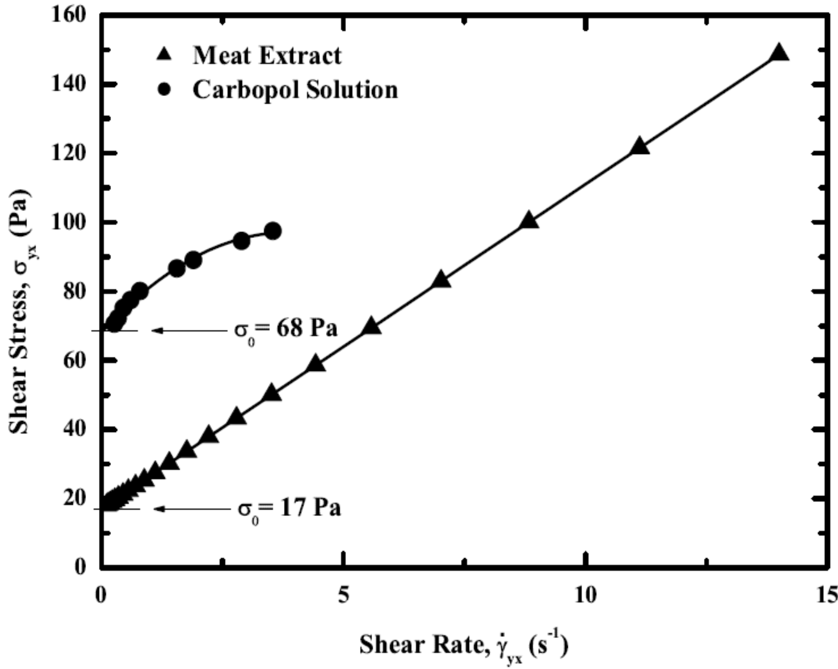
$$\dot{\gamma}_{yx} = 0 \qquad |\sigma_{yx}| < |\sigma_0^H| \qquad (7-19a)$$

وهناك نموذج لزوجة آخر شائع الاستخدام للموائع اللزجة اللدنة وهو ما يسمى بنموذج كاسون، والذي يعود أصله إلى نمذجة تدفق الدم، لكن تم إيجاد بأنه تقريبٌ جيدٌ للعديد من المواد الأخرى أيضاً ، ويكتب على النحو التالي:

$$\sqrt{|\sigma_{yx}|} = \sqrt{|\sigma_0^C|} + \sqrt{\eta_C|\dot{\gamma}_{yx}|} \qquad |\sigma_{yx}| > |\sigma_0^C| \qquad (7-20a)$$

$$\dot{\gamma}_{yx} = 0 \qquad |\sigma_{yx}| < |\sigma_0^C| \qquad (7-20a)$$

بينما يتضمن الشكل (7-4) منحنيات التدفق الكمي لمائع Bingham ولمائع زائف لدونة الخضوع فإن الشكل (7-7) يظهر البيانات التجريبية لمحلول بوليمر اصطناعي ولمُستخلَص مستخرج من اللحم. يتوافق مستخلص اللحم (σ_0= 17 Pa) مع المعادلة (7 –18) :



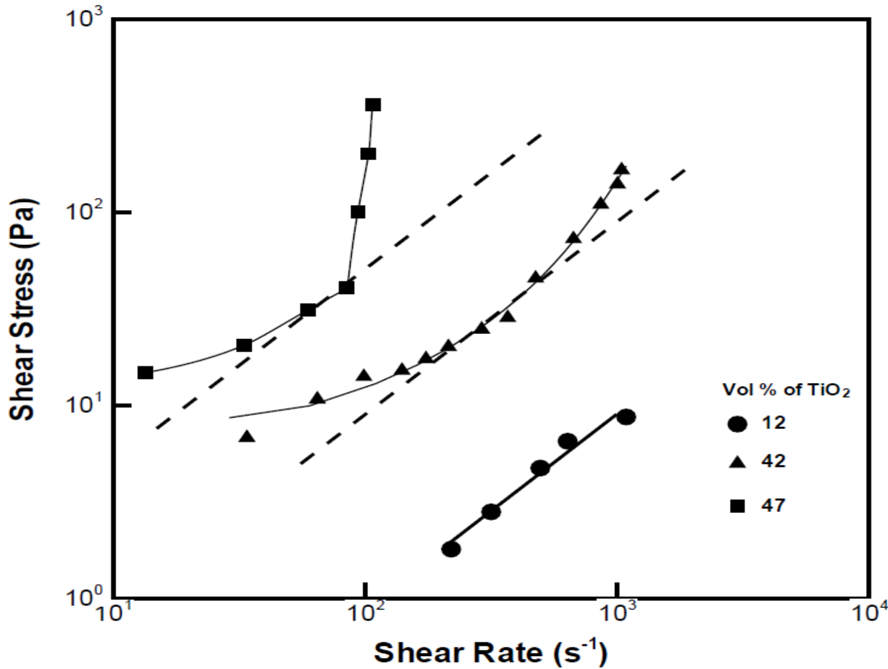
شكل(7-7): بيانات إجهاد القص ومعدل القص لمستخلص اللحم ولمحلول البوليمير carbopol والذي يُظهر سلوك Bingham اللدن والسلوك اللزج اللدن على التوالي

في حين أن محلول البوليمير carbopol (σ_0= 68 Pa) يظهر سلوك مائعٍ زائف لدونة الخضوع.

تشمل الأمثلة النموذجية لموائع إجهاد الخضوع الدم، واللبن، ومعجون البندورة، والشوكولاتة الذائبة، وصلصة البندورة، ومستحضرات التجميل، وطلاء الأظافر، والرغويات، والمعلقات، وغير ذلك. أخيراً، وقبل ترك هذا القسم الفرعي، من المناسب أن نذكر هنا أن مسألة وجود إجهاد خضوع حقيقي من عدمه هي - ومنذ فترة طويلة - مسألة جدال ومناقشة في أدبيات هذا الموضوع. حيث ينظر العديد من الباحثين إلى إجهاد الخضوع على أنه انتقال من السلوك الشبيه بالمادة الصلبة إلى السلوك الشبيه بالمادة المائعة والذي يتجلى بالانخفاض المفاجئ في اللزوجة (بمقدار عدة أضعاف في العديد من المواد) على نطاق ضيق للغاية من معدل القص. من الواضح أن الإجابة على سؤال ما إذا كانت مادة ما لديها إجهاد خضوع أم لا ترتبط ارتباطاً وثيقاً باختيار مقياس زمني للمشاهدة. على الرغم من هذه الصعوبة الأساسية، فإن فكرة وجود إجهاد خضوع واضح هي ذات قيمة كبيرة في سياق التطبيقات الهندسية، وخاصة لتطوير وتصميم المنتجات في قطاعات الأغذية والأدوية والرعاية الصحية .

7-2-2-7- سلوك مثخِّن للقوام بالقص أو موسِّع :

إن هـذا الصـنف مـن الموائـع مشـابه للـنظم زائفـة اللدونـة في أنهـا لا تظهـر أي إجهـاد خضوع، ولكن لزوجتها الظاهرية تزداد مع زيادة معدل القص وبالتالي الاسم "مثخِّن للقوام بالقص". لوحظ هذا النوع من السلوك في البداية في المعلقات المركزة، ويمكن للمرء أن يفسره نوعياً على النحو التالي: في حالة الراحة، يكون فراغ المعلق في حده الأدنى ويكون السائل الموجود في العينة كافياً لملء الفراغات تماماً. عند مستويات القص المنخفضة، يزيِّت السائل حركة كل جسيم إلى ما بعد الآخر وبالتالي ينخفض الاحتكاك بين المادة الصلبة والمادة الصلبة إلى حده الأدنى، وبالتالي تكون الإجهادات الناتجة صغيرة. لكن عند معدلات القص العالية فإن الخليط يتوسع قليلاً (مشابه لذلك المشاهد في الكثبان الرملية) بحيث لا يكون السائل المتوفِّر كافياً لملء الفراغ الزائد ومنع التماس المباشر (والاحتكاك) بين المادة الصلبة والمادة الصلبة. يؤدي هذا إلى نشوء إجهادات قص أكبر بكثير من تلك المشاهدة في العينة قبل التوسّع عند معدلات القص المنخفضة. تسبب هذه الآلية ارتفاعاً سريعاً في اللزوجة الظاهرية $\eta = (\sigma/\dot{\gamma})$ مع الزيادة في معدل القص. يوضح الشكل (7-8) البيانات التمثيلية لتراكيز مختلفة لمعلقات TiO_2 . تم وضع خطوط وحدة الميل (السلوك النيوتوني) في هذا الشكل لكي تستخدم كنقطة مرجعية.



شكل(7-8) بيانات نموذجية لإجهاد القص ومعدل القص لمعلقات TiO_2 تظهر سلوكاً مثخناً للقوام بالقص

من الواضح أن هذه المعلقات تظهر سلوكاً مخففاً للقوام بالقص وسلوكاً مثخناً للقوام بالقص عبر نطاقات مختلفة من معدلات القص و/أو عند تراكيز مختلفة. جذبت هذه الفئة الفرعية - من بين الموائع المستقلة عن الزمن - اهتماماً قليلاً جداً وبالتالي هناك كميةٌ قليلةٌ جداً من البيانات الموثوقة متوفرة عنها. في الواقع، حتى ما يقارب أوائل الثمانينات اعتُبر هذا النوع من سلوك التدفق نادراً، ولكن مع الاهتمام المتزايد في الآونة الأخيرة بالتعامل مع الأنظمة ذات الحمولات الصلبة العالية ومعالجتها لم يعد الأمر كذلك.. تشمل الأمثلة النموذجية على الموائع التي تظهر سلوكاً مثخّناً للقوام بالقص المعلقات السميكة ومعاجين الكاولين، وTiO_2، ودقيق الذرة في الماء ..... إلخ .

تقترح المعلومات المحدودة المتاحة حالياً (تقتصر في الغالب على القص البسيط) أنه من الممكن تقريب بيانات $\sigma - \dot{\gamma}$ لهذه الأنظمة أيضاً إلى نموذج قانون القوة، أي المعادلة (14 – 7)، حيث يأخذ مؤشر قانون القوة (n) قيماً أكبر من الواحد وعلى الرغم من ندرة البيانات الريولوجية عن هذه الأنظمة، فإنه من غير الممكن القول بثقة ما إذا كانت هذه المواد تظهر أيضاً لزوجات محدودة عند النهايات $\dot{\gamma} \to 0$ و $\dot{\gamma} \to \infty$.

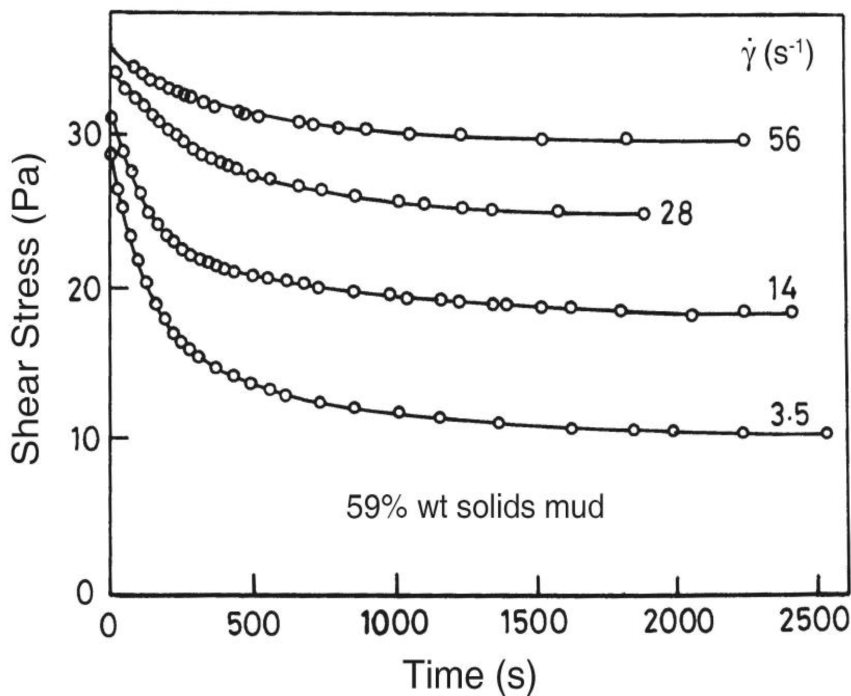
8-2-2-7- السلوك المعتمد على الزمن :

تُظهر العديد من المواد - لا سيما في قطاعات تصنيع الأغذية والأدوية ومنتجات العناية الشخصية - خصائص تدفقٍ لا يمكن وصفها بتعبير رياضي بسيط على شكل المعادلة (10 – 7) أو (11 – 7) يعود هذا لأن لزوجاتها الظاهرية ليست فقط تابعةً لإجهاد القص المطبق (σ) أو معدل القص ($\dot{\gamma}$)، ولكن أيضًا للمدة التي تعرض خلالها المائع للقص بالإضافة إلى تاريخها الحركي السابق. على سبيل المثال، تؤثر طريقة تحميل العينة في مقياس اللزوجة - عن طريق السكب، أو عن طريق الحقن باستخدام حقنة، الخ - على القيم الناتجة لإجهاد القص σ أو معدل القص $\dot{\gamma}$. بالمثل عندما تُقصُّ موادٌ مثل معلقات البنتونيت في الماء والفحم في الماء والطين الأحمر (أحد مخلفات صناعة الألومينا)، ومعجون الأسمنت، والنفط الخام الشمعي، ومحاليل وكريمات اليدين، إلخ عند قيمة ثابتة لـ $\dot{\gamma}$ بعد فترة طويلة من الراحة فإن لزوجاتها تنخفض تدريجياً حيث تتحطم بناها الداخلية بشكل مستمر. بينما ينخفض عدد تلك الروابط البنيوية التي يمكنها أن تتحطم، فإن معدل تغير اللزوجة مع الزمن يقترب من الصفر. على العكس من ذلك، في الوقت الذي تتحطم فيه البنية، فإن معدل إعادة بناء الروابط يزداد، وفي النهاية يتم الوصول إلى حالة من التوازن الديناميكي عند توازن معدلات التحطم والبناء. بشكلٍ مشابه فقد ذكر عدد لا بأس به من الأنظمة في الأدبيات يعزز فرضُ القص الخارجي عليها بناءَ البنى الداخلية وبالتالي تزداد لزوجاتها الظاهرية مع زيادة مدة القص.

اعتماداً على استجابة المادة للقص على مدى فترة من الزمن فإنه من المعتاد تقسيم سلوك الموائع المعتمد على الزمن إلى نوعين: تميّع بالرجّ (thixotropy) والتلبّن (rheopexy) (أو عكس التميّع بالرجّ). ستتم مناقشة هذين النوعين بشيء من التفصيل في القسم التالي.

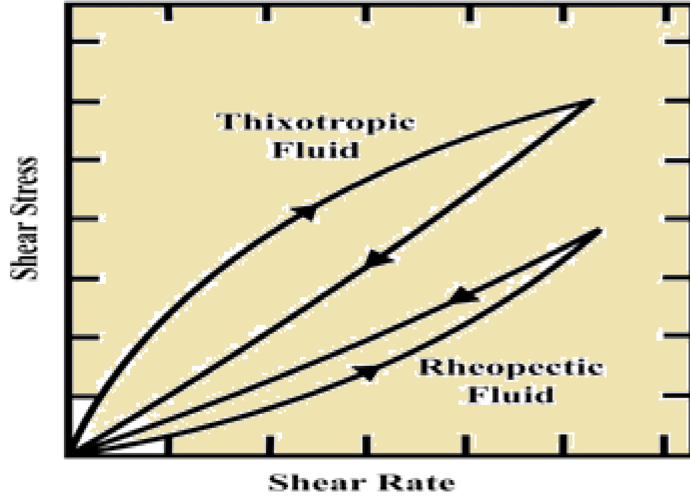
9-2-2-7-السلوك التميّع بالرجّ :

يتم تصنيف المادة على أنها متميّعة بالرج إذا ما تناقصت لزوجتها الظاهرية $\eta = \sigma/\dot{\gamma}$ (أو قيمة σ لأن $\dot{\gamma}$ ثابت) مع مدة القص إذا ما تعرضت للقص عند معدل ثابت، كما هو موضح في الشكل (9 - 7) لمعلق الطين الأحمر المحتوي على 59% (وزناً) مواد صلبة .



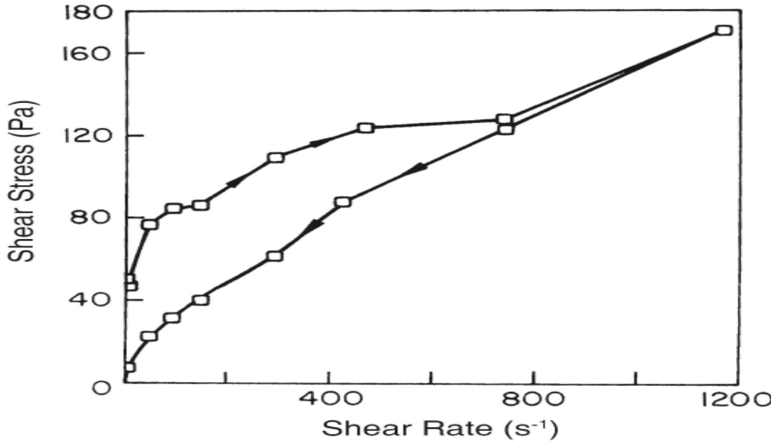
شكل (9-7) بيانات تجريبية نموذجية تظهر سلوك تميّعٍ بالرج في معلّق الطين الأحمر

كلما ازدادت قيمة $\dot{\gamma}$ تدريجياً فإن الوقت اللازم للوصول إلى قيمة التوازن الخاصة بـ σ ينخفض بشكل كبير. على سبيل المثال، عند $\dot{\gamma} = 3.5\ s^{-1}$ يكون الزمن من مرتبة 1500 ثانية وينخفض إلى قيمة 500 ثانية عند $\dot{\gamma} = 56\ s^{-1}$. بشكلٍ معاكس، إذا تم قياس منحني التدفق لمائعٍ كهذا في تجربة واحدة تزداد فيها قيمة $\dot{\gamma}$ بمعدل ثابت من الصفر إلى قيمة عظمى ما ومن ثم تنخفض بنفس المعدل، فإننا نحصل على حلقة التلاكؤ (hysteresis) الموضحة بيانياً في الشكل (10-7).



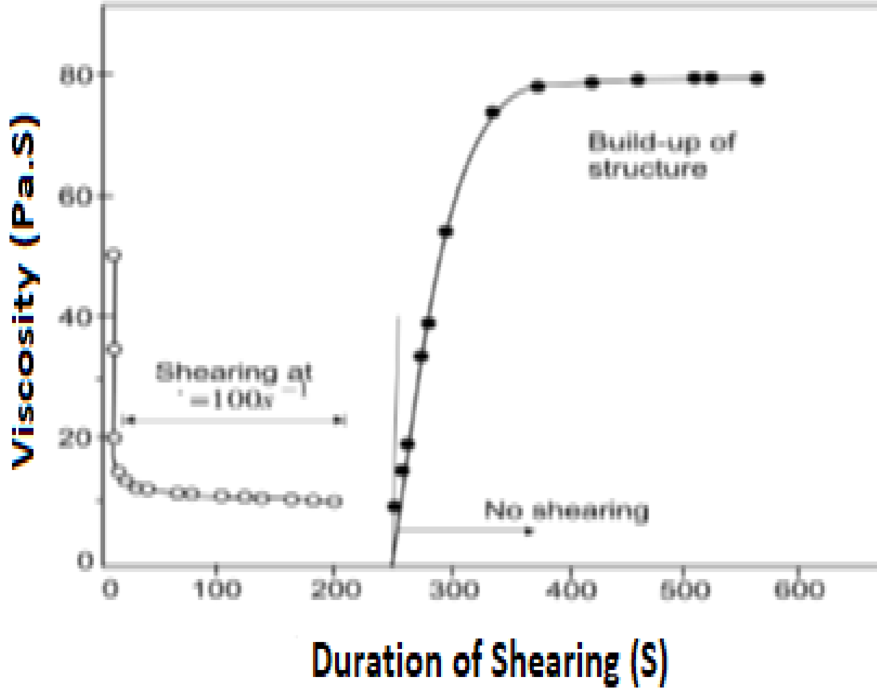
شكل(10-7): سلوك إجهاد قص ومعدل قص نوعي لمواد متميّعة بالرج ومتلبّنة

بطبيعة الحال فإن ارتفاع وشكل المنطقة التي تحيط بها الحلقة تعتمد على الظروف التجريبية مثل معدل الزيادة/النقص في معدل القص، والقيمة العظمى لمعدل القص، والتاريخ الحركي السابق للعينة. من المنطقي القول إنه كلما كانت مساحة المنطقة أكبر كلما كان السلوك المعتمِد على الزمن للمادة قيد الدراسة أكثر شدةً. من الواضح أن مساحة المنطقة المغلقة ستكون صفراً بالنسبة لمائع لزج تماماً، أي ليس من المتوقع حدوث تأثير التلاكؤ للموائع المستقلة عن الزمن . ويوضح الشكل (11-7) بيانات لسلوك المعجون الاسمنتي المتميّع بالرج. علاوة على ذلك فإنه في بعض الحالات قد يكون انهيار البنية عكوساً، أي عند إزالة القص الخارجي وبعد فترة طويلة من الراحة، قد يستعيد المائع (إعادة بناء البنية) القيمة الأولية للزوجة.



شكل(11-7) التميّع بالرج في معجون إسمنتي

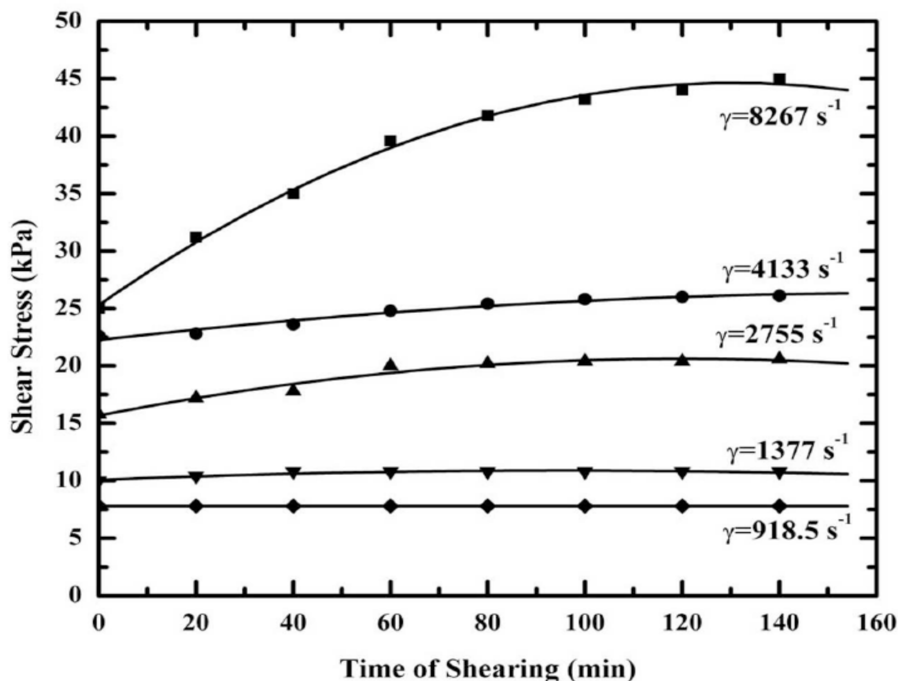
وتوضح البيانات الخاصة بمستحضر.موضح في الشكل (12-7) هذا الجانب من تميّع القوام بالرجّ. تنخفض هنا اللزوجة الظاهرية من Pa.s 80 إلى Pa.s 10 في حوالي 5 إلى 10 ثوان عندما يتعرض للقص عند $\dot{\gamma} = 100\ s^{-1}$ وعند إزالة القص يعاد البناء إلى القيمة الأولية تقريباً في حوالي 50 إلى 60 ثانية.



شكل(12-7) : انهيار وبناء البنية في مستحضر للجسم مُسجّل الملكية

10-2-2-7-سلوك التلبّن :

إن الموائع القليلة نسبياً والتي تظهر تميعاً سلبياً بالرج، أي أن لزوجاتها الظاهرية (أو إجهاد القص المقابل) تزداد بازدياد وقت القص، تعرف باسم الموائع المتلبِّنة. من الواضح في هذه الحالة أن حلقة التلاكؤ تكون مقلوبة (الشكل 10-7). على عكس الموائع المتميعة بالرج، فإن القص الخارجي يعزز بناء البنية في هذه الحالة. ليس من غير المألوف أن يُظهر المائع نفسه كلاً من التميع بالرج والتلبّن عند توليفات مناسبة من التركيز ومعدل القص. يوضح الشكل (13-7) البداية التدريجية للتلبّن من أجل بوليستر مشبع في 60 درجة مئوية .



شكل(11-7) السلوك التلبني في بوليستر مشبع

لاحظ أنه يُظهر سلوكاً مستقلاً عن الوقت حتى حوالي $\dot{\gamma} \approx 1377\ s^{-1}$ وأن أول علامة للتلبّن تظهر فقط عند حوالي $\dot{\gamma} \approx 2755\ s^{-1}$ والذي يشتدّ أكثر مع زيادة قيمة القص المطبق خارجياً. تشمل الأمثلة الأخرى التي يشاهد فيها التلبّن معلقات أوليئات الأمونيوم وخماسي أكسيد الفاناديوم عند معدلات قص معتدلة وملائط (slurries) الفحم والماء ومحاليل البروتينات. بسبب كثرة حدوث سلوك التميع بالرج في مجموعة من الحالات الصناعية فقد تم تخصيص الكثير من الجهود البحثية لتطوير الأطر الرياضية لنمذجة هذا النوع من السلوك الريولوجي .

بصورة عامة، يمكن تمييز ثلاثة مناهج منفصلة هي الاستمرارية والحركيات الهيكلية الميكروية والحركيات الهيكلية. في إطار نهج الاستمرارية يتم تعديل نماذج اللزوجة الموجودة (مثل Bingham اللدن، المعادلة (18-7)، أو Herschel-Bulkley، المعادلة (19-7)، أو Reiner-Rivlin، إلخ) من خلال فرض أن تكون اللزوجة وإجهاد الخضوع توابع للزمن. يقود هذا بدوره لاتساق قانون القوة ولأن تكون مؤشرات سلوك التدفق توابع للزمن. من الواضح أن تفاصيل البنية الميكروية والتغيرات الخاصة بها قد تم تجاهلها تماماً في هذا النهج، وبالتالي ليس من الممكن على الإطلاق ربط بارامترات النموذج بالعمليات الفيزيائية الأساسية المسؤولة عن التغييرات البنيوية في المادة الخاضعة للقص وعن البناء اللاحق للبنية عند إزالة القص. من ناحية أخرى، يتطلب

نهج النمذجة المبني على أساس النظر في البنية الميكروية معرفة مفصلة للقوى داخل الجسيم والتي – لسوء الحظ – نادراً ما تكون متوفرة للأنظمة ذات الأهمية العملية مما يعوق بشدة التقدم في هذا الاتجاه. أخيراً، تتوقف نماذج التميع بالرج المبنية على مُعامِلات الحركية البنيوية على مدى صحة بارامتر مفرد واحد، هو ξ ، والذي هو - بطريقةٍ ما - مقياس لحالة البنية في النظام. من الواضح أنه يتراوح بين الصفر (بنية متحطمة كلياً أو لا توجد بنية!) والواحد (بناء كامل للبنية). يشمل هذا النهج بالتالي معادلتين: علاقة $\dot{\gamma}$ - σ من أجل قيمة ثابتة لـ ξ والتباين t - ξ المشابه لمعادلة السرعة لتفاعل كيميائي عكوس. يتجلى هذا النهج من خلال الصيغة التالية للمعادلة المقدمة من قبل Houska ، والتي كانت ناجحة إلى حدٍ ما في تقريب سلوك التميع بالرج لعشرات الأنظمة:

$$\sigma_{yx} = (\sigma_0 + \sigma_{01}) + (m_0 + \xi m_1)\dot{\gamma}^n \qquad (7-21a)$$

$$\xi = a(1-\xi) - b\xi\dot{\gamma}^{\varepsilon} \qquad (7-21b)$$

حيث σ وm هما ما يسمى بالقيم الدائمة لإجهاد الخضوع ومعامل الاتساق على التوالي؛ وσ_{01} و m_1 هما المساهمتان المقبلتان والمعتمدتان على الزمن واللتان افتُرض أنما معتمدتان خطياً على القيمة الحالية لـ ξ. بالتالي فإن المعادلة $(7-21a)$ صالحة لقيمة ثابتة لبارامتر البنية ξ، والمعادلة $(7-21b)$ هي العلاقة الحركية التي تحكم علاقة t - ξ. يعطي الحد الأول، أي a(1 - ξ)، معدل بناء البنية (يفترض أنه يحدث عند حالة الراحة، أي $\dot{\gamma} = 0$) في حين يعطي الحد الثاني على الجانب الأيمن من المعادلة $(7-21b)$ معدل الانهيار والذي هو تابع لكل من ξ و$\dot{\gamma}$. يحتوي هذا النموذج بكامله 8 بارامترات، ثلاثة منها $(a,\ b,\ \varepsilon)$ هي ثوابت حركية والـ 5 المتبقية هي بارامترات المادة. من الواضح أن تقييمهم يتطلب بروتوكولات تجريبية أكثر تعقيداً من تلك المطلوبة لتوصيف سلوك الموائع المستقلة عن الزمن حتى في القص أحادي البعد.

7-2-2-11-السلوك اللزج المرن : بالنسبة للمادة الصلبة المرنة المثالية يكون الإجهاد في حالة القص متناسب طردياً مع الانفعال (strain). بالنسبة للشد (التوتر) ينطبق قانون Hooke المعروف، وثابت التناسب هو معامل يونغ المعتاد G، أي:

$$\sigma_{yx} = -G\frac{dx}{dy} = G(\dot{\gamma}_{yx}) \qquad (7-22)$$

عندما تتشوه المادة الصلبة المرنة المثالية بشكلٍ مرن، فإنها تستعيد شكلها الأصلي عند إزالة الإجهاد. لكن إذا تجاوز الإجهاد المطبق إجهادَ الخضوع المميِّز للمادة، فإن العودة الكاملة لا تحدث وسوف يحصل *الزحف* (creep)، أي أن المادة الصلبة ستُعاب! يقدم الجدول (7-3) قيمًا نموذجية لمعامل يونغ *G* لمجموعة من المواد بما في ذلك المعادن والبلاستيك والمحاليل البوليمرية والغروية والمواد الغذائية الخ، وتوفر هذه القيم أساساً لدعوة بعض المواد بالمواد الصلبة اللينة.

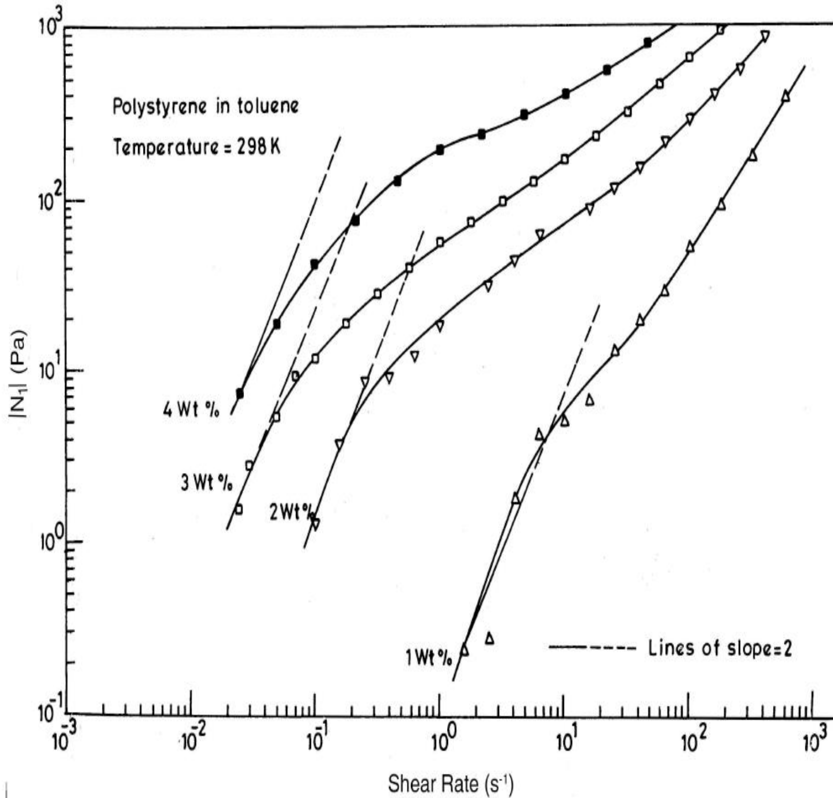
المادة	**قيمة *G***
زجاج	70 جيغا باسكال
الألومنيوم والنحاس وسبائكهما	100 جيغا باسكال
الفولاذ	200 جيغا باسكال
ألياف موجَّهة ذات معامل عال	> 300 جيغا باسكال
الخرسانة	20-10 جيغا باسكال
الحجارة	60–40 جيغا باسكال
خشب	10–1 جيغا باسكال
جليد	10 جيغا باسكال
اللدائن الهندسية	20–5 جيغا باسكال
جلد	100–1 ميغا باسكال
مطاط	5–0.1 ميغا باسكال
المحاليل البوليمرية والغروية	100–1 باسكال
السباغيتي الجافة	3 جيغا باسكال
جزر	40-20 ميغا باسكال
إجاص	30–10 ميغا باسكال
بطاطا	14–6 ميغا باسكال
خوخ	20–2 ميغا باسكال
التفاح الخام	14–6 ميغا باسكال
هلام الجلاتين	0.2 ميغا باسكال
موز	3–0.8 ميغا باسكال

جدول(3-7): القيم التمثيلية (تقريبية) لمعامل يونغ

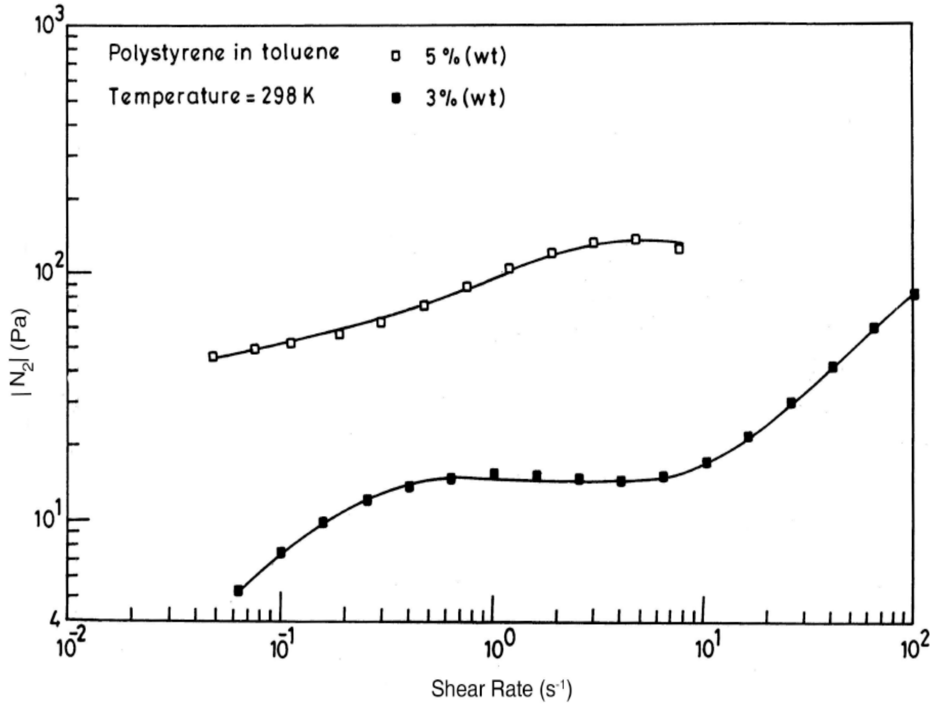
في الحالة المقابلة لدينا المائع النيوتوني الذي يكون إجهاد القص الخاص به متناسباً مع معدل القص، المعادلة (1-7). تظهر العديد من المواد ذات الأهمية الهندسية كلاً من التأثيرات المرنة واللزجة عند الظروف المناسبة. في ظل غياب تأثيرات التميّع بالرج والتلبّن فإنه يقال إن المادة لزجة مرنة. من الواضح أن التدفق اللزج تماماً والتشوه المرن تماماً يمثلان الحالتين الحديتين من السلوك اللزج المرن. بالنسبة لبعض المواد تلاحظ فقط هاتين الحالتين الحديتين في الممارسة العملية. بالتالي - وعلى سبيل المثال – لا يمكن للمرء أن يلاحظ لزوجة الجليد أو مرونة الماء! علاوة على ذلك، فإن

استجابة المادة لا تحكمها فقط بنيتها، ولكن أيضاً الظروف الحركية التي تمر بها. لذلك فإن التمييز بين الصلب والمائع، وبين الاستجابة المرنة واللزجة هو اعتباطي وشخصي. إلى حد ما وبالتالي هو بعيدٌ عن كونه واضحاً. على العكس من ذلك فإنه ليس من غير المألوف لنفس المادة أن تُظهر سلوكاً لزجاً شبيهاً بالموائع في حالة ما وسلوكاً مرناً شبيهاً بالمواد الصلبة في حالة أخرى.

تُظهر العديد من المواد ذات الأهمية العملية (لا سيما المصهورات البوليمرية ومحاليلها، ومحاليل الصابون، والمواد الهلامية، والسائل الزليلي، والمستحلبات، والرغويات، الخ) سلوكاً لزجاً مرناً، بالتالي لدى هذه المواد بعض القدرة على تخزين واستعادة طاقة القص. إن أحد نتائج هذا النوع من سلوك المائع هو أن حركة القص تؤدي إلى حدوث إجهادات (تدعى بالإجهادات العمودية) في الاتجاه المتعامد على اتجاه القص. إن الإجهادين العموديين الناتجين أو اختلافي الإجهاد العمودين N_1 وN_2، والمعرَّفين بالمعادلتين (7-3) و(7-4)، هما أيضاً متناسبين مع معدل القص في القص البسيط. يوضح الشكل (7-12) والشكل (7-13) بيانات تمثيلية حول اختلافَي الإجهاد العموديين الأول والثاني لمحاليل البوليستايرين في التولوين عند 298K.



شكل (7-12) بيانات اختلاف الإجهاد العمودي الأول النموذجية لمحاليل البوليستايرين في التولوين



شكل (7-13) بيانات اختلاف الإجهاد العمودي الثاني النموذجية لمحاليل البوليستايرين في التولوين

من المعتاد في بعض الأحيان أن يتم إدخال معاملي اختلاف الإجهاد العمودي الأول (الرئيسي) والثاني (الثانوي) ψ_1 و ψ_2 والمعرَّفين على النحو التالي:

$$\psi_1 = \frac{N_1}{(\dot{\gamma})^2} \qquad (7-23a)$$

$$\psi_2 = \frac{N_2}{(\dot{\gamma})^2} \qquad (7-23b)$$

على الرغم من أن معدلي التباين الفعليين لـ N_1 وN_2 مع معدل القص يختلفان من نظام لآخر فإنه من الممكن وضع بعض الملاحظات العامة هنا. بشكلٍ عام فإن معدل انخفاض ψ_1 مع $\dot{\gamma}$ هو أكبر من ذلك المتعلق باللزوجة الظاهرية. عند معدلات القص المنخفضة جداً من المتوقع أن تتغير N_1 بالتناسب مع $\dot{\gamma}^2$ أي أن ψ_1 سيُقارب قيمةً ثابتةً عند هذا الحد، كما تؤكد بعض البيانات الموضحة في الشكل (7-14).

غالباً ما تؤخذ النسبة (N_1/σ) على أنها مقياساً لشدة السلوك اللزج المرن، وتحديداً فإن ($N_1/2\sigma$) يدعى بالقص القابل للاسترداد (قيمه الأكبر من 0,5 ليست غير مألوفة للأنظمة البوليميرية العالية اللزوجة والمرونة). عموماً إن تحديد N_1 تجريبياً هو أكثر صعوبة من ذلك الخاص بإجهاد القص σ. من ناحية أخرى فإن القياسات الخاصة باختلاف الإجهاد العمودي الثاني هي أكثر صعوبة من تلك الخاصة باختلاف الإجهاد العمودي الأول. في معظم الحالات يكون N_2 عادة حوالي 10% من N_1 من ناحية

الكمية وهو سلبي. لقد افتُرض أن N_2 هي صفر حتى منتصف السبعينيات، لكن ذلك لم يعد يعتبر صحيحاً. يتم توصيف المادة اللزجة المرنة في القص البسيط من حيث $N_1(\dot{\gamma})$، و$N_2(\dot{\gamma})$ و$\sigma(\dot{\gamma})$، علاوة على ذلك، يُستخدم بالتالي اختلافي الإجهاد العموديين لتصنيف المائع على أنه غير مرن ($N_1<<\sigma$) أو أنه مادة لزجة مرنة ($N_1>>\sigma$).

لقد اقتصرت المناقشة حتى الآن على تدفق القص البسيط الأحادي الاتجاه، والآن نوجه انتباهنا إلى تشكيلي تدفق النموذجين الآخرين، وهما تدفق القص التذبذبي والتدفق الاستطالي (elongational). في حين يقدم الأول طريقة مريحة لتوصيف السلوك اللزج المرن الخطي، فإن الثاني يشير إلى مثالية العديد من التدفقات المهمة صناعياً.

12-2-2-7-حركة القص التذبذبية :

هناك شكل آخر شائع للحركة يُستخدم لتوصيف الموائع اللزجة المرنة وهو ما يدعى بحركة القص التذبذبية. من المفيد أن ننظر هنا في استجابة المائع النيوتوني والصلب الخاضع لقانون Hooke لانفعال قص يتغير بشكل جيبي مع الزمن على النحو التالي:

$$\gamma = \gamma_m sin\omega t \qquad (7\text{-}24)$$

حيث : γ_m هي السَّعة (amplitude) و ω هي تردد الانفعال المطبق.

من أجل الصلب المرن الخاضع لقانون Hooke، يرتبط الإجهاد خطياً مع الانفعال،أي:

$$\sigma = G\gamma = G\gamma_m sin\omega t \qquad (7\ \text{-}25)$$

لا يوجد بالتالي أي انتقال في الطور بين إجهاد القص وانفعال القص في هذه الحالة. من ناحية أخرى، وبالنسبة للمائع النيوتوني، يرتبط إجهاد القص بمعدل القص، أي:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \gamma_m\omega \sin\left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right) \qquad (7-26)$$

وهنا:

$$\sigma = \eta\dot{\gamma} = \eta\gamma_m\omega \sin\left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right) = \sigma_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right) \qquad (7-27)$$

من الواضح في هذه الحالة أن إجهاد القص الناتج يكون خارج الطور بمقدار (π/2) من الانفعال المطبق، بالتالي يقدِّم قياس زاوية الطور والتي يمكن أن تتغير بين صفر (استجابة مرنة بحتة) و(π/2) (استجابة لزجة بحتة) - وسيلةً مناسبةً لقياس مستوى اللزوجة والمرونة لمادة ما . وهنا لا داعي أن نضيف أن القيم الصغيرة لـ تمثل سلوكاً مرناً في الغالب بينما تتوافق القيم الكبيرة مع السلوك اللزج. بالنسبة للمنطقة اللزجة المرنة الخطية، يمكن للمرء تحديد اللزوجة المعقدة η^* على النحو التالي:

$$\eta^* = \eta' + i\eta'' \qquad (7\ \text{-}\ 28)$$

حيث ترتبط الأجزاء الحقيقية و التخيلية η' و η'' بدورها بمعاملي التخزين ('G) والضياع (G'') على النحو التالي:

$$\eta'' = \frac{G'}{\omega} \quad and \quad \eta' = \frac{G''}{\omega} \qquad (7-29)$$

يتم تعريف معاملي التخزين والضياع 'G وG'' على النحو التالي:

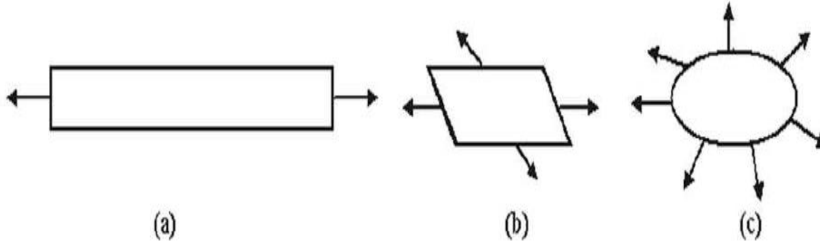
$$G' = \frac{\sigma_m}{\gamma_m}\cos\delta \qquad (7-30)$$

$$G'' = \frac{\sigma_m}{\gamma_m}\sin\delta \qquad (7-31)$$

إن العديد من الأدوات المتاحة تجارياً مجهزة لاختبارات القص التذبذبي.

7-2-2-13-التدفق الاستطالي :

يُعرف تدفق النموذج هذا أيضاً باسم تدفق الامتداد أو التمدّد. في هذا النوع من التدفق يتمدّد عنصر المائع في اتجاه واحد أو أكثر، على غرار ذلك المصادف في غزل الألياف ونفخ الأغشية. تشمل الأمثلة الأخرى حيث يحدث هذا النوع من التدفق التحام الفقاعات وتعزيز استخراج النفط باستخدام الدفق بالبوليمر. هناك ثلاثة أشكال من التدفقات الاستطالية: أحادية المحور وثنائية المحور والمستوية، كما هو موضح تخطيطيًا في الشكل (7-14).

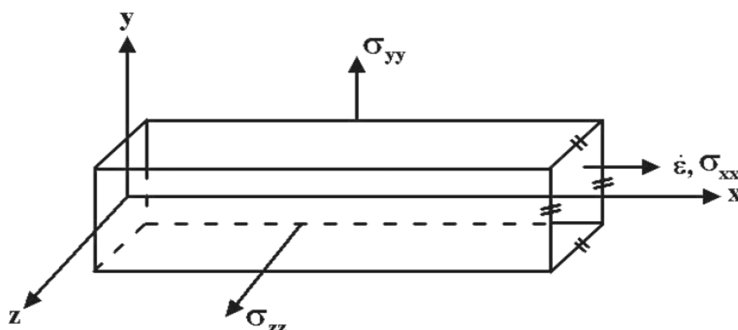


شكل(14 -7) تمثيل تخطيطي للتمدّد الأحادي المحور (a) والثنائي المحور (b) والمستوي (c)

إن غزل الألياف هو مثال على التمدد أحادي المحور (ولكن معدل التمدد يختلف على طول الليف)، ونفخ الأغشية الأنبوبي الذي يتضمن بثق البوليمرات المنصهرة من خلال قالب على شكل شق وسحب الصفيحة إلى الأمام وإلى الجانب هو مثال على التمدد ثنائي المحور. هناك مثال آخر وهو صناعة الزجاجات البلاستيكية، والتي تصنع عن طريق البثق أو القولبة بالحقن ثم يتبع ذلك التسخين والنفخ إلى الحجم المطلوب باستخدام تيار هواء عالي الضغط. إن خطوة النفخ هي مثال على التمدد ثنائي المحور – بسبب التناظر – مع وجود معدلات تمدّد متساوية في الاتجاهين.

يؤثر أسلوب التمدد بطبيعة الحال على الطريقة التي يقاوم بها المائع التشوه، ويمكن أن يشار إلى هذه المقاومة بشكلٍ فضفاض على أنها يتم تحديدها كمياً من حيث

اللزوجة الاستطالية التي تعتمد ليس فقط على معدل التمدد ولكن أيضاً على نوع التدفق التمددي. لنعتبر - من أجل تبسيط الأمور – التمدد أحادي المحور لعنصر مائعٍ ما بمعدل ثابت $\dot{\epsilon}$ في الاتجاه x كما هو موضح في الشكل (7-15).

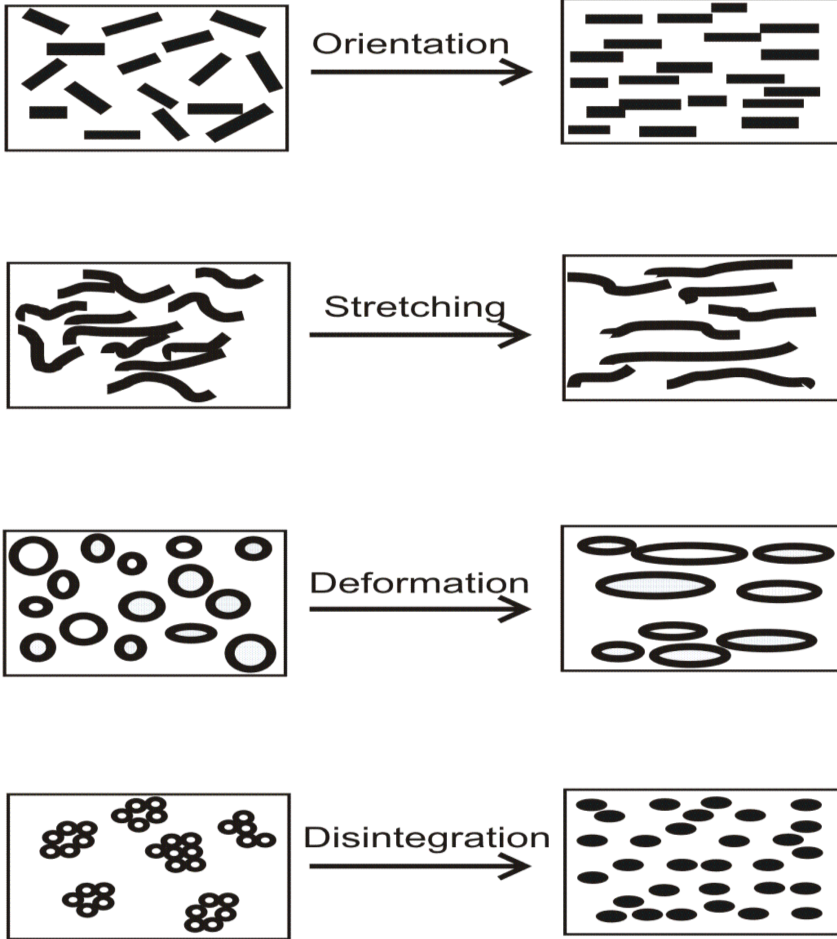


شكل(7-15): تدفق تمددي أحادي المحور

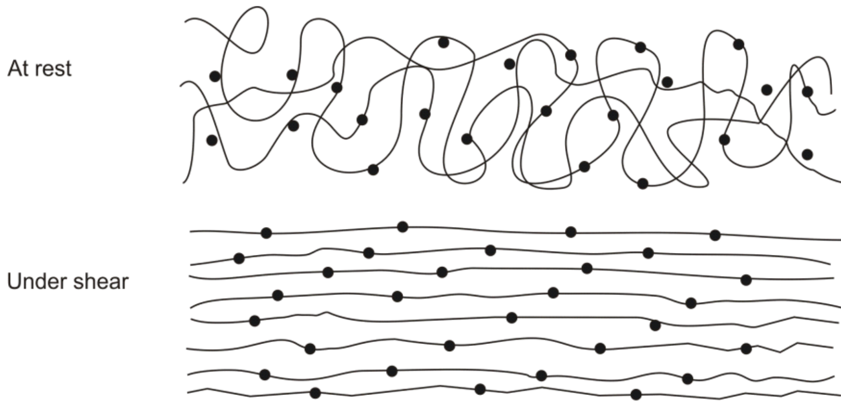
7-3-أصول السلوك غير النيوتوني :

يبين النقاش السابق وبشكلٍ واضح أن السمات غير النيوتونية لا تلاحظ فقط في معظم الحالات فيما يسمى بالموائع البنيوية (structured) ولكن توجد رابطة مباشرة بين نوع ومدى سلوك المائع غير النيوتوني وتأثير الإجهاد المطبق خارجياً على حالة البنية. تُستخدم بالتالي قياسات السمات غير النيوتونية بشكل متكرر لتأكيد حالة البنية في المائع. على العكس من ذلك يستطيع المرء أن يهندس بنية المادة للتأثير على الخصائص الريولوجية المرغوبة لمنتجٍ ما. لكن وقبل فحص دور البنية من المفيد مراجعة افتراضين أساسيين متضمَّنين في مبدأ القص أو اللزوجة الاستطالية أو المعقدة، وتوابع المادة الأخرى مثل η، σ_0، N_1، N_2، G، الخ. أولاً، إن صلاحية فرضية الاستمرارية قد تم افتراضها ضمناً، أي اعتُبرت تفاصيل البنية الميكروية غير مهمة في تقييم مواصفات التدفق الكلي وإن لم تكن هناك موائع حقيقية مستمرة البنية بشكلٍ حقيقي. بالتالي فإن استخدام اللزوجة كخاصية فيزيائية متوسطة زمنياً وفراغياً لا يشكل أية مشاكل بالنسبة للمواد منخفضة الوزن الجزيئي (الأبعاد الجزئية 1-10 نانومتر). بشكلٍ مشابه فإن محاليل البوليميرات المركزة أو مصهوراتها، والأنظمة الغروية، والأنظمة المخفضة للتوتر السطحي الشبيهة بالدودة ...الخ ، كلها تمتلك بنىً ميكروية" بقياس يقارب µm 1-2 والذي يمكن تقريبه إلى حالة الاستمرارية إلا في حالة التدفق في قنوات ضيقة جداً و/أو ملتوية. يسمح ذلك بدوره بتحديد المواصفات المتوسطة وإعطائها قيماً لا تتأثر بأبعاد ممرات التدفق. بالتالي طالما أن قياس البنى الميكروية أصغر بكثير من المقاييس الخطية المميِّزة للجهاز فإنه يمكن للمرء أن يفعّل فرضية الاستمرارية. يتعلق الأمر الثاني بفرضية التجانس الفراغي (تساوي الخصائص) للمادة بحيث يكون التوسّط الفراغي (space-averaging) له معنى. أخيراً - وكما أشرنا هنا - إذا كانت جميع الموائع بنيوية بحدود مختلفة فما هو الأمر الخاص جداً بالنسبة للمواد التي تُظهر مواصفات غير نيوتونية؟ إن الميزة الأساسية المميِّزة هي أن البنى الموجودة في الأنظمة المعقدة ريولوجياً ليست فقط انتقالية بطبيعتها ولكن يمكن أن تضطرب

بتطبيق إجهادات منخفضة نسبياً. على سبيل المثال، إن بنية الهكسان الحلقي تبقى غير مضطربة بتطبيق إجهادات حتى MPa 1. في المقابل إن القيمة المقابلة هي من مرتبة الـ Pa 100 باسكال بالنسبة لبوليمر له وزن جزيئي معتدل، وحوالي MPa 200 ميللي باسكال بالنسبة لتشتت غرواني يحتوي على وحدات تدفق من مرتبة 100 نانومتر. إن البنية يمكن أن تضطرب بهذه الدرجة من السهولة مما يؤدي إلى ظهور مواصفات تدفق غير نيوتوني في النظام. و يوضح الشكل (16- 7) والشكل (17 – 7) الأنواع المختلفة للبنى الميكروية التي يمكن أن تُصادف في الأنظمة المعقدة ريولوجياً في حالة الراحة (ذات الصلة بظروف التخزين)، وكيف تضطرب هذه الأنظمة تحت فعل القص (في ظروف التدفق).



شكل (16-7) رسم تخطيطي للبنى في مشتتات غير نيوتونية في الراحة وتحت القص

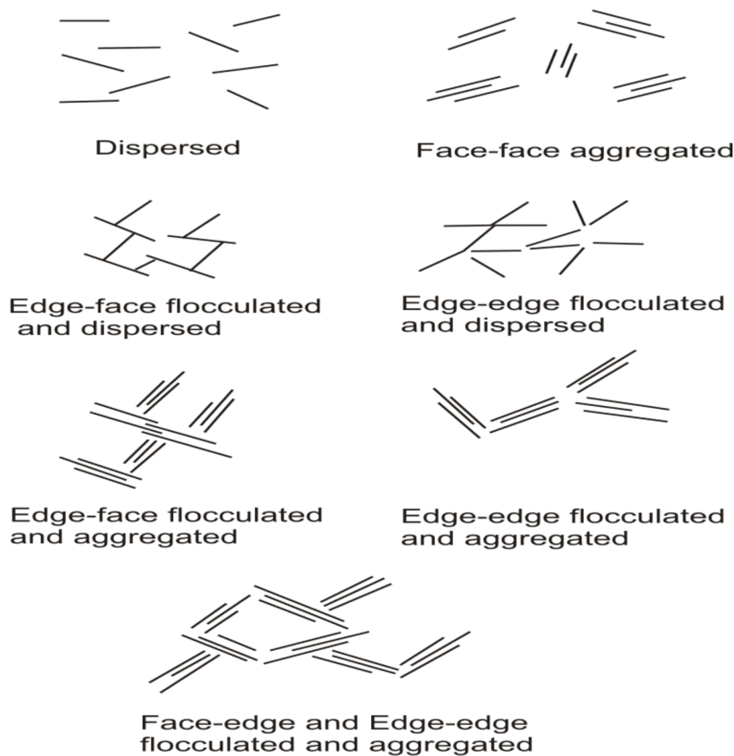


شكل (17-7) تمثيل تخطيطي لفك جزيئية ميكروية تحت تأثير القص

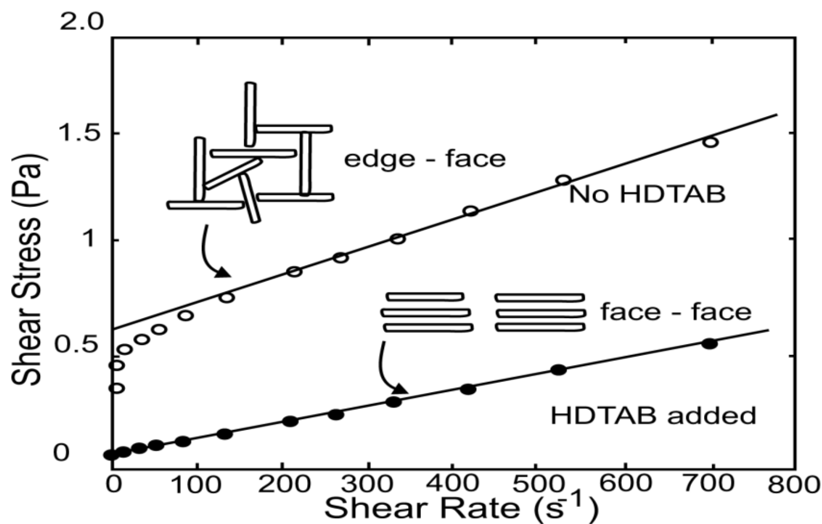
تحتوي معظم الأنظمة على جسيمات غير منتظمة الشكل ذات توزّع حجمي (قطرات وفقاعات في المستحلبات والرغويات على التوالي)، أو جزيئات متفرعة و/أو متشابكة في حالة الأنظمة البوليمرية، أو مجموعات من الجسيمات متشكلة بشكل حر في المعلقات، الخ. تتوجّه الوحدات ذات البنية الميكروية بشكل عشوائي وفقاً لحالة الطاقة الدنيا لها. في مستويات القص المنخفضة يقاوم النظام أي تشوه من خلال تقديم مقاومة عالية جداً إما عن طريق إظهار قيمة عالية جداً من اللزوجة أو إجهاد الخضوع. بازدياد قيمة إجهاد القص الخارجي تدريجياً، تستجيب الوحدات البنيوية (المعروفة أيضا باسم "وحدات التدفق") عن طريق اصطفافها مع اتجاه التدفق، أو عن طريق التشوّه لتتوجّه على طول خطوط التيار، أو عن طريق تفكك التكتلات إلى وحدات تدفق صغيرة أو إلى جسيمات أولية. تصبح جزيئات البوليمر التي تكون ملفوفة ومتشابكة في معدلات القص المنخفضة مفككة تدريجياً، وأخيراً تستقيم بالكامل كما يبين(17 - 7). تسهِّل كل هذه التغييرات في البنى الميكروية التدفق، أي تؤدي هذه التغيرات إلى خفض اللزوجة الظاهرية مع القص مما يؤدي إلى سلوك مخفِّف للقوام.

هناك العديد من الاحتمالات الأخرى التي تسهم في تغييرات البنية الميكروية اعتماداً على القيم النسبية لمختلف القوى المنخرطة. على سبيل المثال، في معلقات الجسيمات الأصغر من الميكرون (مساحة سطحية كبيرة)، يمكن أن تُسبب قوى جذب فان دير فالس بين الجسيمات بالتصاقها ببعضها البعض. هذا الأمر هو المسؤول عن التكتل في الأنظمة الغروية (حجم الجسيمات 1 مايكرومتر). بالمثل، فإن التنافر بين الشحنات المتشابهة على سطح الجسيم ينتج قوة طاردة تمنع التخثر. يمكن - بالتالي – تعديل السلوك الريولوجي لمعلقات الكاولين المائية عن طريق ضبط pH النظام أو بإضافة محلول مخفض للتوتر السطحي. يتكون الكاولين من جسيمات تشبه الصفيحات ووفقاً لنوع شحنات السطح فإنه يمكن أن يشكّل أنواع مختلفة من

التكتلات مثل نوعي حافة وجه أو وجه وجه في شروط عدم التدفق كما في (18 – 7). كما هو متوقع ينتج عن هذين الاحتمالين سلوكاً ريولوجياً مختلفاً تماماً ، انظر الشكل (19 – 7) .



شكل (18-7) أشكال ممكنة من التكتلات في معلقات الكاولين



شكل (19-7) تأثير شكل التكتلات على سلوك القص الثابت لمعلقات الكاولين

تم تضمين المناقشة القصيرة السابقة هنا لإعطاء الدارس الشعور بأنه من الممكن إضفاء خصائص غير نيوتونية مرغوبة عن طريق ضبط العوامل الفيزيائية الكيميائية.

يكفي أن نقول هنا أن الهدف النهائي هو أن نكون قادرين على التنبؤ مسبقاً بنوع البنية الميكروية اللازمة لمنتج ما للحصول على المواصفات الريولوجية المرغوبة للاستخدام النهائي.

7-4- الآثار المترتبة في التطبيقات الهندسية :

من الطبيعي أن نطرح السؤال حول كيفية تأثير كل ذلك على التطبيقات الهندسية التي تتضمن التدفق وانتقال الحرارة والكتلة مع السوائل غير النيوتونية ؟

من أجل الإجابة على هذا السؤال دعونا نحصر مناقشتنا بالجزء الخاص بالتدفق فقط من أجل التبسيط. من حيث المبدأ، يمكن للمرء دائماً وضع معادلة الاستمرارية ومعادلات كمية الحركة لـ Cauchy (مكتوبة في شكلها المختصر لمائع غير قابل للانضغاط) على النحو التالي:

$$\nabla . V = 0 \qquad (7-32)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \rho g + \nabla \sigma \qquad (7-33)$$

بالنسبة للموائع النيوتونية، يرتبط ممدِّد الإجهاد الفرقي (deviatoric) σ بمعدل ممدّد التشوّه بواسطة معادلات مشابهة لتلك المعطاة في المعادلات من (7 – 7)إلى 7) (9 –. لقد تم بذل جهد بحثي كبير في البحث عن تعبير مماثل لـ σ للموائع اللانيوتونية والذي يجب أن يكون قادراً ليس فقط على التنبؤ بالزوجة المعتمدة على القص، وإجهاد الخضوع، والتأثيرات اللزجة المرنة في القص والتدفقات الممتدة، والتلبّن، والتميّع بالرج ولكن ينبغي أيضاً أن تلبي متطلبات سواء الإطار (frame indifference)، وموضوعية المادة، وما إلى ذلك. نظراً لتنوع المواد والتي تتراوح بين محاليل البوليمر المتجانسة إلى البوليمرات البلورية السائلة، ومحلول تخفيف التوتر السطحي الشبيه بالديدان (worm-like micellar solution)، والمعلقات، والرغويات، على سبيل المثال.

هذا بالفعل أمر طويل لتوقع أن معادلة ممثِّلةً واحدةً سوف تؤدي بشكل مرضٍ وفي جميع الظروف لجميع أنواع المواد. على الرغم من التقدم الكبير المحرز في هذا المجال فإن اختيار العلاقة الممثِّلة المناسبة هي (وستظل) مسترشدةً بالحدْس وبالخبرة حتى الآن لتحديد الخصائص السائدة للمادة المدروسة جنباً إلى جنب مع نوع التدفق (يسوده القص، ممتدّ بقوة، مختلط، وما إلى ذلك). تتوفر التقييمات النقدية للحالة الراهنة للفن والإرشادات المفيدة لاختيار التعبير المناسب لـ σ (المعادلة الممثِّلة) في

المراجع العلمية. لذلك إذا كان أحد ما قادراً على تطوير معادلة ممثلة مناسبة و/أو قادراً على اختيار واحدة من التشكيلة الحالية، فمن الممكن وضع المعادلات التفاضلية الحاكمة مع الشروط الحدية المناسبة، وإن كانت هناك حالات يكون فيها وصف الشروط الحدية هو أيضاً بعيدا عن الوضوح لا سيما في التدفقات مع السطح الحر والانزلاق، الخ. علاوة على ذلك، حتى ولو أهملت الحدود العطالية غير الخطية (المقابلة لرقم رينولدز صفري) يتم إهمال تدفق عدد رينولدز) تماماً في معادلة كمية الحركة، فإن المعادلات الناتجة ماتزال غير خطية للغاية بسبب المعادلة الممثلة (لزوجة معتمدة على القص، تأثيرات غير خطية بسبب اللزوجة والمرونة، وما إلى ذلك). لذلك، باستثناء التدفقات البسيطة كالتدفق المكتمل أحادي البعد في القنوات الدائرية والمستوية، فإن المرء يلجأ في كثير من الأحيان إلى الحلول العددية والتي تشكل بحد ذاتها تحديات هائلة من حيث كونها متطلبةً للغاية للموارد ومن ناحية صعوبات التقارب الحادة، وبالتالي فإنها تنهار من أجل القيم الكبيرة لأعداد ديبورا وWeissenberg . أخيرًا، يواجه التجريبيون أيضاً تحديات مماثلة من حيث توصيف المواد (الريومترية) وكذلك من حيث تفسير وتمثيل البيانات باستخدام مجموعات لابعدية من أجل الريومترية (rheometry).

باختصار، إن تحليل مشاكل ظواهر النقل ذات الأهمية الهندسية التي تنطوي على سلوك مائع غير نيوتوني هي أكثر تحدياً من تلك التي تستلزم الموائع النيوتونية البسيطة. في الواقع إنها مهمة سهلة للغاية أن ننتج تأثيراً تجريبياً باستخدام مائع غير نيوتوني في المختبر، والذي لا يمكن حتى شرحه نوعياً بمساعدة نموذج المائع النيوتوني. من المناسب أن نذكر هنا أيضاً أنه ليس من الممكن دائماً تبرير افتراضات عدم الانضغاط (فكّر في الرغويات ومشتتات الغاز والسائل) وتساوي الخصائص (isotropy) (فكر في البلاستيك المقوى بالألياف، والبوليمرات البلورية السائلة، والمواد المركبة النانوية، وغيرها) المتضمَّنة في المناقشة المقدَّمة في هذا الفصل التمهيدي.

7-5- ملاحظات ختامية :

تم في هذا الفصل النظر في أنواع مختلفة من المواصفات غير النيوتونية التي تُظهرها الخلائط الزائفة التجانس بما في ذلك المواد الرغوية والمستحلبات والمعلقات والعجائن والأنظمة ذات الوزن الجزيئي الكبير (مصهورات ومحاليل البوليميرات ومحاليل البروتينات) والمواد المخفضة للتوتر السطحي (محاليل الصابون) واللدائن المدعّمة والبوليميرات في حالتها المنصهرة .

تتم المناقشة هنا في المقام الأول على استجابة هذه الموائع البنيوية في حركة القص الثابت الأحادية الاتجاه (مع إشارة محدودة إلى القص التذبذبي والتدفقات الاستطالية) مما يؤدي إلى ظهور مواصفات مخففة للقوام بالقص، ومثخّنة للقوام بالقص، ولزجة لدنة، ومميعة بالرجّ، وتلبنيّة، ولزجة مرنة. لقد تم وصف كل مما سبق ببعض التفاصيل المدعمة بالبيانات التجريبية الممثِّلة على المواد الحقيقية. كما تم تقديم تفسير نوعي لكل نوع من أنواع السلوك لتقديم بعض الأفكار حول طبيعة العمليات المادية الأساسية. يوفر هذا بدوره بعض الأفكار حول كيفية تغيير البنية الميكروية للنظام لتحقيق ميزات غير نيوتونية مرغوبة. على العكس من ذلك فقد تم استخدام قياس ومراقبة اللزوجة، وإجهاد الخضوع بشكل متكرر لضبط جودة المنتج في قطاعات المنتجات الغذائية ومنتجات العناية الشخصية، على سبيل المثال. تم اختتام الفصل بالتأكيد على تأثير خصائص التدفق غير النيوتوني في نمذجة العمليات الهندسية.

قائمة المصطلحات

ا

أبراج محشوة	Packed towers
أبعاد	Dimensions
إجهاد الخضوع	Yield Stress
إجهاد القص	Shear Stress
إجهادات ناظمية	Normal stresses
أحادي الطور	Single phase
إحداثي رأسي	Ordinate
أديباتي (بدون تبادل حراري)	Adiabatic
ارتفاع بيني	Meta center height
اضطراب	Turbulence
امتصاص	Absorption
انبوبة انسياب	Stream tube
انتروبي	Entropy
انتشار	Diffusion
انتقال جزيئي	Molecular transfer
انتقال الكتلة	Mass transfer
انثالبي	Enthalpy
انزياح	Displacement
انضغاطي	Compressible
انضغاطية	Compressibility
انطلاق (سرعة غير متجهة)	Speed
انفصال الجريان	Separation of flew
إينموميتر ذو سلك ساخن	Hot wire anaemometer
أوساط مسامية	Porous media

ب

بارومتر	Barometer
بدون تبادل حراري (أديباتي)	Adiabatic
بوليمر	Polymer
بيزومتر	Piezometer

ت

تأثير الجدران	Wall effect
تباطؤ، تلكؤ	Deceleration
تحليل بُعدي	Dimensional analysis
تدرّج السرعة	Velocity gradient
تراوح	Fluctuations
ترشيح	Filtration
تركيب جزيئي	Molecular structure
تصميم العمليات الصناعية	Process design
تصفية مفاجئة	Sudden contraction
تفاضل جزيئي	Partial differentiation
تفاضلي	Differential
تلاصق	Adhesion
تماسك	Cohesion
تميع	Fluidization

Neutral equilibrium	توازن متعادل
Stable equilibrium	توازن مستقر
Relative equilibrium	توازن نسبي
Velocity distribution	توزيع السرعة
Sudden enlargement	توسيعة مفاجئة
	ث
Universal gas constant	ثابت الغازات العام
Specific weight	ثقل نوعي
Notch	ثلمة
	ج
Turbulent flow	جريان اضطرابي
Plug flow	جريان انسدادي
Streamline flow	جريان انسيابي
One dimensional flow	جريان وحيد البُعد
Fully developed flow	جريان تام التكوين
Stratified flow	جريان تراصفي
Tow Phase flow	جريان ثنائي الطور
Annular flow	جريان حلقي
Subsonic flow	جريان دون الصوت
Spray flow	جريان رذاذي
Sonic flow	جريان صوتي
Laminar flow	جريان صفحي
Unsteady flow	جريان غير مستقر
Non uniform flow	جريان غير منتظم
Supersonic flow	جريان فوق صوتي
Viscous flow	جريان لزج
Slug flow	جريان متلاطم
Wavy flow	جريان متموج
Uniform flow	جريان منتظم
Parabolic flow	جريان مكافئ دوراني
	ح
Weir	حاجز غاطس
State	حالة
State of the system	حالة المنظومة
Control volume	حجم التحكم
Specific volume	حجم نوعي
Critical	حرج
Brownian movement	حركة براونية
Reciprocating movement	حركة ترددية
Momentum	الزخم
Conserve of energy	حفظ الطاقة
Conserve of mass	حفظ الكتلة
Convection	حمل
Pipe bend	ثني انبوب
	خ
Capillarity	خاصة شعرية
Choke	خانق

Relative roughness	خشونة نسبية
Fanno line	خط فانو
Stream lines	خطوط الانسياب
	د
Reduced temperature	درجة الحرارة المنخفضة
Impeller	دفاعة مروحية
Particles	دقائق
Forced vortex	دوامة قسرية
Cyrcle	دورة
Thermodynamics	ديناميك الحرارة
Gas dynamics	ديناميك الغاز
	ذ
	ر
Reynolds number	رقم رينولدز
Pseudo Reynolds number	رقم رينولدز الوهمي
Froude number	رقم فرود
	ز
Momentum	زخم
	س
Terminal falling velocity	سرعة السقوط النهائية
Angular velocity	سرعة زاوية
Sonic velocity	سرعة صوتية
Shear velocity	سرعة قصبية
Instantaneous velocity	سرعة لحظية
Velocity	سرعة متجهة
Priming	سقي المضخة
	ش
Wheatstone bridge	شبكة ويتستن
Surface tension	شد سطحي
Work	شغل
Shaft work	شغل عمود الإدارة
	ص
Net forces	صافي القوى
Net positive suction head	صافي عمود السحب الموجب
Absolute zero	صفر مطلق
Valve	صمام
Gate valve	صمام بوابي
Check valve	صمام غير مرجع
Foot valve	صمام غير مرجع سفلي
globe valve	صمام كروي
Stuffing box	صندوق الحشوة
	ض
Compressor	ضاغط الغاز
reciprocating compressor	ضاغط ترددي
vapor pressure	ضغط البخار

vacuum pressure	ضغط الفراغ (تخلخلي)
gauge pressure	ضغط المقياس (ضغط نسبي)
partial pressure	ضغط جزئي
impact pressure	ضغط صدمي
reduced pressure	ضغط منخفض
absolute pressure	ضغط مطلق
Relative pressure	ضغط نسبي
Hydrostatic pressure	ضغط هيدروستاتيكي
	ط
Pressure energy	طاقة الضغط
Potential energy	طاقة الوضع
Kinetic energy	طاقة حركية
internal energy	طاقة داخلية
Laminar	صفحي
Transition layer	طبقة انتقالية
Laminar sub layer	طبقة تحتية انطباقية
Boundary layer	طبقة حدية
Turbulent boundary layer	طبقة حدية اضطرابية
Laminar boundary layer	طبقة حدية صفحية
Water hammer	طرق مائي
Bouncy	طفو
	ظ
Cavitation	ظاهرة التكهّف
	ع
Overturning moment	عزم التدوير
Head	عمود
Suction	عمود السحب للمضخة
Pressure head	عمود الضغط
Kinetic head	عمود الطاقة الحركية
Potential head	عمود الوضع
Element	عنصر صغير (جسيم)
Flotation	عوم
	غ
Perfect gas	غاز تام
Real gas	غاز حقيقي
Non-ideal gas	غاز غير مثالي
Ideal gas	غاز مثالي
Casing	غلاف
	ف
Vacuum	فراغ
Centrifuge	طارد مركزي
Cyclone	طارد مركزي مخروطي
Orifice	فوهة
	ق
Pascal's law	قانون باسكال
Pipe fitting	قطع تركيب الأنابيب

Parabola	قطع مكافئ
Frictional force	قوة الاحتكاك
Drag force	قوة الجر
Form force	قوة الجر الشكلية
Viscous drag	قوة الجر اللزجة
Lift force	قوة الرفع
Centrifugal force	قوة الطرد المركزي
Shear force	قوة القص
Up thrust	قوة دافعة
Resultant force	قوة محصلة
Inertia force	قوة العطالة
Viscous force	قوى لزجة
	ك
Density	كثافة
Relative density	كثافة نسبية
Mole fraction	كسر مولي
Vector quantity	كمية شعاعية
	ل
Viscosity	لزوجة
Dynamic viscosity	لزوجة ديناميكية(تحريكية)
Eddy viscosity	لزوجة دوامية
Kinematic viscosity	لزوجة كينماتيكية (حركية)
	م
Continuous substance	مادة متصلة
Manometer	مانومتر
Deferential manometer	مانومتر تبايني
Inclined manometer	مانومتر مائل
Inverted manometer	مانومتر مقلوب
Compressible fluid	مائع انضغاطي
Thixotropic fluid	مائع تسيلي
Working fluid	مائع شغال
incompressible fluid	مائع غير انضغاطي
Non viscous fluid	مائع غير لزج
Non Newtonian fluid	مائع غير نيوتوني
Viscous fluid	مائع لزج
Newtonian fluid	مائع نيوتوني
Evaporator	مبخر
Velocity vector	متجه السرعة
State variables	متغيرات الحالة
Infinitesimal	متناهي الصغر
Mean velocity	متوسط السرعة
Mean pressure	متوسط الضغط
Mean hydraulic diameter	متوسط القطر الهيدروليكي
Mean free path	متوسط المسار الحر
Dimensionless group	مجموعة غير بعدية
Finite	محدد
Steam boiler	مرجل بخاري

Centre of pressure	مركز الضغط
Centre of buoyancy	مركز الطفو
Centroid	مركز المساحة
Meta center	مركز بيني
Fan	مروحة
Suspension	مزيج معلق
Specific surface	مساحة سطحية نوعية
Porosity	مسامية
Minimum fluidizing velocity	مسامية التميع الدنيا
Emulsion	مستحلب
Arbitrary datum	مستوى إسناد اختياري
Strainer	مصفى
Positive displacement pump	مضخة الإزاحة الموجبة
centrifugal pump	مضخة الطرد المركزي
Metering pump	مضخة المعايرة
Reciprocating pump	مضخة ترددية
Rotary pump	مضخة دوارة
Diaphragm pump	مضخة ذات رق
Gear pump	مضخة ذات مسننات
Piston pump	مضخة ذات مكبس
Air lift pump	مضخة رافعة بالهواء
Multistage pump	مضخة متعددة المراحل
Mono pump	مضخة مونو
Nash Hytor pump	مضخة ناش هايتور
Navier –Stokes equations	معادلات نافير - ستوكس
Continuity equation	معادلة الاتصال
Empirical equation	معادلة تجريبية
Equation of state	معادلة تغير حالة الغاز
Power law equation	معادلة ذات قوة جبرية
Kozeny equation	معادلة كوزني
Fanning friction factor	معامل احتكاك فاننغ
Friction factor	معامل الاحتكاك
Compressibility factor	معامل الانضغاطية
Coefficient of contraction	معامل التقلص
Consistency factor	معامل التجانس
Lift coefficient	معامل الرفع
Modulus of elasticity	معامل المرونة
Bulk modulus of elasticity	معامل المرونة الحجمي
Flow rate	معدل الجريان
Volumetric flow rate	معدل الجريان الحجمي
Mass flow rate	معدل الجريان الكتلي
Fixed bed reactor	مفاعل الطبقة الثابتة
Vena contracta	مقطع أقلص
Rotameter	مقياس الجريان الدوار
Bourdon gauge	مقياس بوردون
Venture meter	مقياس فنتوري
Orifice meter	مقياس فوهي
Quantity meter	مقياس كمي

Nozzle	منفث
Laval nozzle	منفث لافال
Pressure wave	موجة ضغط
Particle mechanics	ميكانيك الدقائق
	ن
Blower	نافخ
Reciprocating blower	نافخ ترددي
Turbo- blower	نافخ توربيني
Continuum theory	نظرية الاتصال
Parallel axis theorem	نظرية المحور الموازي
Kinetic theory	نظرية حركية
Reynolds transport theorem	نظرية رينولدز للانتقال
Maxing length theory	نظرية طول الامتزاج
Permeability	نفاذية
Duty point (operating point)	نقطة التشغيل
	هـ
	و
Specific gravity	وزن نوعي نسبي
	ي
Deform	ينحرف

المراجع العلمية

1 White, F.M., Fluid Mechanics, 7th Ed. McGraw-Hill, 2011

2 Buddhi,N.,Hewakandamby, A first course in Fluid Mechanics for Engineers, Book Boon company, 2015

3 Evett, B. Jack, Cheng, Li, 2500 sloved problems in Fluid Mechanics and hydraulics, 2 Ed., McGraw-Hill, 1988

4 Noel de Nvers, Fluid Mechanics for Chemical Engineering, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1991

5 Bird,R.B.,Stewart,W.E.,and Lightfoot E.N., Transport Phenomena, 2 Ed., John Wiley & Sons, 2002.

6 Fay J.A., Introduction to Fluid Mechanics, MIT Press, 1994

7 Fox R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., Introduction to Fluid Mechanics, 6th Ed., John Wiley & Sons, 2003.

8 Perry, R.H. and Green, D.W., Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th Ed., McGraw-Hill, 1997

9 Douglas, J.F., Gasiorek, J., Swaffield, J., and Jack, L., Fluid Mechanics 6th Ed., Prentice Hall, 2011

10 Robert W. Fox, R.W., McDonald, A.T. and Pritchard P.J., Introduction to Fluid Mechanics, 7th Ed., 2005.

11 Bird, R.B, Stewart, W.E and Lightfoot, E.N., Transport Phenomena, 2nd Ed, Wiley & Sons, 2002.

12 Douglas, J.F., Gasiorek, J.M., and Swaffield, J.A., Fluid Mechanics, 4th Ed, Prntice Hall, 2001

13 Holland, F.A. and Bragg, R., Fluid Flow for Chemical Engineers, 2nd Ed, Edward Arnold, 1995.

14 Mathieu, J. and Scott, J., An Introduction to Turbulent flow, Cambridge University Press, 2000

15 Holland, F. and Bragg R., Fluid flow for Chemical Engineers, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, 1995

16 Davidson, P.A., Turbulence: An introduction for scientists and engineers, Oxford University Press, 2004.

17 Karassik, I.J, Messina, J.P., Cooper, P., and Heald, C.C., Pump Handbook, 4th Ed., McGraw-Hill, 2008.

18 Fay J.A., Introduction to Fluid Mechanics, MIT Press, 1994.

19 Fox R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., Introduction to Fluid Mechanics, 6th Ed., John Wiley & Sons, 2003.

20 Wilkison, M, A., Non-Newtonian Fluids,Pergamon press,1960
21 Holland, F. and Bragg R., Fluid flow for Chemical Engineers, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, 1995
22 Davidson, P.A., Turbulence: An introduction for scientists and engineers, Oxford University Press, 2004.
23 Sagaut, P, Deck, S. and Terracol, M., Multiscale and Multiresolusion Approaches in Turbulence, Imperial Collage Press, 2006.
24 Coulson, J.M., Richardson, J.F., J R Backhurst and J H Harker, Chemical Engineering Vol1, 6th Ed., Butterworth-Heinemann, 1999.
25 Ghtta, A., Fluid Mechanics,1Ed., Al Baath University press, 1981.
26 Azzouz, D., Fluid Mechanics,2Ed., Aleppo University press, 1992.

Al Baath University

Faculty of chemical and petroleum engineering



FLUID MECHANICS

Dr. Adnan Al Sheikh Hamoud

Al Baath University
Faculty of Chemical and Petroleum Engineering



FLUID MECHANICS

Dr. Adnan Al Sheikh Hamoud

سعر الكتاب :   ليرة سورية